

BATIMENT ET IMMOBILIER : MIEUX MODELISER LA TRANSITION

Étude cartographique de l'écosystème
de modélisation du secteur

RAPPORT FINAL

EXPERTISES 

Oct.
2024

REMERCIEMENTS

Nous remercions chaleureusement l'ensemble des personnes qui ont contribué, dans le cadre des réunions de pilotage et de suivi, des entretiens et des ateliers mis en place pour cette étude, ou plus simplement en nous transmettant des informations complémentaires, à la richesse collective de notre réflexion :

Denise ALMEIDA (CSTB), Charles ARQUIN (POUGET Consultants), Rémi BABUT (The Shift Project),
Fatoumata BARRY (CSTB), Luc BERCEGOL (DGALN), Rémi BONVALET (Institut négaWatt), Jean BOSVIEUX (FNAIM),
Jules BOURGUEIL (CGDD), Béatrice BOUTCHENIK (CGDD), Vincent BRIAND-BOUCHER (Énergies Demain),
Gaël CALLONNEC (ADEME), Henri CASELLA (CSTB), Arthur CAZAUBIEL (INSEE), Maxime CHAMMAS (Artelys),
Benoît CHAINTREUIL (GRDF), Bernard COLOS (FFB), Christophe CROCOMBETTE (RTE), Julie DAUNAY (Carbone 4),
Fabrice DECELLAS (EDF), Olivier DE GUIBERT (CGDD), Matthieu DENOUAL (Enedis), Rafaelle DESPLATS (ADEME),
Jérémy EL BEZE (CSTB), Emmanuel FERNANDEZ (Énergies Demain), Florent GAUTHIER (Enerdata),
Robin GIRARD (Mines Paris PSL), Louis-Gaëtan GIRAUDET (CIRED), Julie GOUSSEN (INSEE), Hadrien HAINAUT (I4CE),
Adrien JACOB (Institut négaWatt), Bruno LAFFITE (ADEME), Céline LARUELLE (ADEME), Marie-Hélène LAURENT (EDF),
Lucie LEFORT (Artelys), Vincent LEGRAND (Institut négaWatt), Aurélie LE MAÎTRE (GRTgaz),
Philippe LÉONARDON (ADEME), Gaëlle LESTAGE (RTE), Thomas LETZ (Association négaWatt), Julie LE VOT (CGDD),
Guillaume LHEMET (Artelys), Mathilde LOUËRAT (CSTB), Pierre MADEC (OFCE), Samuel MARTIN (Enertech),
Gaëlle MBOCK (Enedis), Nourallah MELLITI (GRDF), Solène METAYER (I4CE), Quentin MINIER (ADEME),
Antoine MONNET (GRDF), Alma MONSERAND (ADEME), Kiarash MOTAMEDI (CGDD),
Jean-Claude MIGETTE (CODA Stratégies), Christian MOLINA (OID), Morgane MOULLIÉ (OID),
André MOUNIER (ADEME/CIRED), Julien PARC (POUGET Consultants), Marin PELLAN (CSTB/ETH Zurich),
Basile PFEIFFER (DGALN), Anna PINEAU (ADEME), Christophe PLANTIER (Enertech), Maximilien PORCHER (RTE),
Félix POUCHAIN (AREP), Philippe QUIRION (CIRED), Guillaume RATEAU (CGDD),
Emmanuel RAUZIER (Association négaWatt), Florian ROLLIN (ADEME), Marie ROUSSELOT (Enerdata),
Didier ROUSTAN (EDF), Bianka SHOAI-TEHRANI (RTE), Romain SOUCHU (Énergies Demain),
Sylvain SOURISSEAU (ADEME), Aïda TAZI (Carbone 4), Antoine TEXEIRA (ADEME), Florian TIRANA (DGEC),
Nicolas TONNET (ADEME), Jonathan VAVRE (Institut négaWatt), Fanny VICARD (ADEME),
Jean-Christophe VISIER (ADEME), Lucas VIVIER (CIRED)

CITATION DE CE RAPPORT

MARIGNAC Yves, DELARGUILLIÈRE Noé, Institut négaWatt, RIESER Thierry, Enertech, GASPARD Albane, ADEME. ADEME, 2023. Bâtiment et immobilier : mieux modéliser la transition – Étude cartographique de l'écosystème de modélisation du secteur. 255 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

**Ce document est diffusé par l'ADEME
ADEME**

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01
Numéro de contrat : 2022MA000398

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Institut négaWatt; Enertech
Coordination technique - ADEME : GASPARD Albane
Direction/Service : Service Bâtiment

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	4
1. OBJECTIF DE L'ETUDE	10
1.1. Contexte.....	10
1.2. Objectif de l'étude	10
1.3. Contenu du rapport.....	11
2. METHODOLOGIE	13
2.1. Périmètre thématique	13
2.2. Rôle des outils de modélisation.....	17
2.3. Détail de la méthodologie.....	19
2.3.1. Entretiens et sélection	19
2.3.2. Réalisation de cartographies.....	22
2.3.2.1. Démarche de cartographie.....	22
2.3.2.2. Intention des cartographies	23
2.3.3. Ateliers	26
2.3.4. Réalisation des fiches « outils »	27
3. TRAME DES CARTOGRAPHIES	29
3.1. Cartographie « Questions et enjeux »	29
3.1.1. Construction	29
3.1.2. Détail des questionnements.....	30
3.2. Cartographie « Champs et paramètres »	34
3.3. Cartographie « Outils et modèles »	36
3.4. Cartographie « Chaînages et couplages »	38
4. PRESENTATION DES MODELES.....	40
4.1. ANTONIO (ADEME).....	40
4.2. CONSOMAT (ADEME).....	41
4.3. MICO (ADEME).....	42
4.4. MODEIRE (ADEME / Association négaWatt).....	43
4.5. Modèle biomasse (ADEME).....	44
4.6. Modèles et AFMD (ADEME).....	44
4.7. Matmat et ImpactsConso (ADEME).....	45
4.8. RENOMAT (ADEME)	46
4.9. USES 2 (ADEME).....	46
4.10. VIVALDI et Data centers (ADEME).....	47
4.11. Artélys Crystal Super Grid (Artelys).....	48
4.12. Outils territoriaux (Artelys).....	49
4.13. Modèle SnW (Association négaWatt).....	50
4.14. négaMAT (Association négaWatt).....	51
4.15. Modèle artificialisation (CGDD).....	51
4.16. TiTAN (CGDD).....	52
4.17. IMACLIM-R (CIRED)	53
4.18. Res-IRF (CIRED / ENPC).....	54
4.19. BTPFlux (CSTB / ADEME).....	55

4.20.	Décarbo-CSTB (CSTB).....	56
4.21.	MENFIS (CSTB / ADEME).....	56
4.22.	ZEPHYR (CSTB).....	57
4.23.	Suite de modèles sectoriels (DGEC).....	58
4.24.	Mésange (DG Trésor / INSEE).....	59
4.25.	OTELO (DHUP / Cerema).....	60
4.26.	Modèle demande électrique (EDF).....	61
4.27.	Modèle demande électrique (Enedis).....	62
4.28.	MOSAIC (Enedis / Mines Paris).....	63
4.29.	EnerMED (Enerdata).....	63
4.30.	Enerter (Énergies Demain)	64
4.31.	Outil cadastral (Énergies Demain).....	65
4.32.	Prosper (Énergies Demain).....	66
4.33.	Outil Perspectives gaz (GRDF).....	66
4.34.	Omphale (INSEE).....	67
4.35.	ECLORE (Institut négaWatt).....	68
4.36.	Planiss'Immo (Institut négaWatt).....	69
4.37.	Building Model (Mines Paris)	69
4.38.	SHAPE-Optim (Mines Paris).....	70
4.39.	ThreeME (OFCE / ADEME / NOE)	70
4.40.	Bat-ADAPT (OID).....	71
4.41.	Outil étude bâtiment (POUGET Consultants / Carbone 4).....	72
4.42.	TETE (CIRED).....	73
4.43.	Amadeus (RTE)	73
4.44.	Outil PTEF (The Shift Project)	74
4.45.	Elioth	75

5. ANALYSE CARTOGRAPHIQUE76

5.1.	Cartographie « Questions et enjeux »	76
5.1.1.	Résultats.....	76
5.1.2.	Analyse.....	80
5.1.3.	Synthèse.....	82
5.2.	Cartographie « Champs et paramètres »	83
5.2.1.	Résultats.....	83
5.2.2.	Analyse.....	85
5.2.3.	Synthèse.....	88
5.3.	Cartographie « Outils et modèles »	89
5.3.1.	Résultats.....	89
5.3.2.	Analyse.....	91
5.3.3.	Synthèse.....	93
5.4.	Cartographie « Chaînages et couplages »	94
5.4.1.	Résultats.....	94
5.4.2.	Analyse.....	96
5.4.3.	Synthèse.....	99
5.5.	Synthèse globale.....	99

6. VERS UNE COMMUNAUTÉ DE LA PROSPECTIVE DU BATIMENT ET DE L'IMMOBILIER ?101

6.1.	État des lieux	101
------	----------------------	-----

6.2.	Bénéfices potentiels	101
6.3.	Freins perçus	102
6.4.	Possibles modalités d'une communauté et projets de collaboration.....	103
6.5.	Analyse et conclusions.....	104

7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 106

ANNEXE – FICHES 107

A1.	ANTONIO (ADEME).....	111
A2.	CONSOMAT (ADEME).....	115
A3.	MICO (ADEME)	117
A4.	MODEIRE (ADEME / Association négaWatt)	120
A5.	Modèle biomasse (ADEME).....	123
A6.	Modèle déchets et modèle AFMD (ADEME).....	125
A7.	MatMat et ImpactsConso (ADEME).....	128
A8.	RENOMAT (ADEME).....	131
A9.	USES 2 (ADEME)	133
A10.	VIVALDI et Data centers (ADEME).....	135
A11.	Artelys Crystal Super Grid (Artelys)	138
A12.	Outils territoriaux (Artelys)	141
A13.	Modèle SnW (Association négaWatt).....	143
A14.	négaMAT (Association négaWatt).....	147
A15.	Modèle artificialisation (CGDD).....	151
A16.	TITAN (CGDD).....	154
A17.	IMACLIM-R (CIRED).....	159
A18.	Res-IRF (CIRED / ENPC)	163
A19.	BTPFlux (CSTB / ADEME)	166
A20.	Décarbo-CSTB (CSTB).....	169
A21.	MENFIS (CSTB / ADEME).....	171
A22.	ZEPHYR (CSTB).....	173
A23.	Suite de modèles sectoriels (DGEC)	175
A24.	Mésange (DG Trésor / INSEE).....	180
A25.	OTELO (DHUP / Cerema).....	183
A26.	Modèle demande électrique (EDF)	186
A27.	Modèle demande électrique (Enedis).....	190
A28.	MOSAIC (Enedis / Mines Paris PSL)	194
A29.	EnerMED (Enerdata)	196
A30.	Enerter (Énergies Demain)	200
A31.	Outil cadastral (Énergies Demain).....	203
A32.	Prosper (Énergies Demain).....	206
A33.	Outil Perspectives gaz (GRDF).....	210
A34.	Omphale (INSEE).....	214
A35.	ECLORE (Institut négaWatt).....	216
A36.	Planiss'Immo (Institut négaWatt).....	219
A37.	BuildingModel (Mines Paris).....	221
A38.	SHAPE-Optim (Mines Paris).....	224
A39.	ThreeME (OFCE / ADEME / NOE).....	227
A40.	BAT-ADAPT (OID)	230
A41.	Outil étude bâtiment (POUGET Consultants / Carbone 4)	232
A42.	TETE (Réseau Action Climat / ADEME)	234
A43.	Amadeus (RTE)	237
A44.	Outil PTEF (The Shift Project)	241
A45.	Elioth (The Shift Project)	244

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	246
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	248
SIGLES ET ACRONYMES	249

RÉSUMÉ

Notre capacité à prévoir de manière adéquate l'évolution et l'utilisation du parc immobilier est essentielle pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de carbone, et, plus largement, de réduire son impact sur l'environnement. Les modèles utilisés dans ce domaine sont donc essentiels pour établir des trajectoires. Alors qu'une large gamme de modèles a été développée depuis longtemps en France pour soutenir de telles politiques environnementales stratégiques, il n'existe pas de revue de l'écosystème de la modélisation. Cette étude présente une analyse de l'écosystème français des modèles liés au secteur du bâtiment. Basée sur des entretiens avec des développeurs de modèles, quatre vues cartographiques originales de l'écosystème et deux ateliers, elle couvre 45 (+3) modèles ou outils développés par un large éventail d'instituts de recherche, d'organismes publics, de bureaux d'études privés et d'ONG.

Le travail est structuré autour de 4 cartographies visant à répondre aux questions suivantes :

- Questions et enjeux : face aux principales questions identifiées soulevées par la transition bâtiment / immobilier, quelles sont celles que les modèles actuels semblent mal aborder, voire pas du tout ?
- Outils et modèles : comment les modèles fonctionnent-ils ? Quel est leur périmètre, leurs méthodes de calcul, leur philosophie et leurs résultats ?
- Champs et paramètres : quels sont les éléments constitutifs des modèles ? Comment décrivent-ils la réalité qu'ils visent à documenter ? Quels éléments et paramètres utilisent-ils et quelles relations entre eux explorent-ils ?
- Chaînes et bouclages : quels sont les liens entre les modèles existants et la nature de ces liens ? Peuvent-ils fonctionner comme un écosystème ?

L'analyse de l'écosystème français de modélisation des bâtiments montre que les modèles représentant le lien énergie-bâtiment constituent l'épine dorsale de l'écosystème et permettent de capturer un large éventail de défis techniques et économiques (électrification, création d'emplois...), ainsi qu'un ensemble émergent de modèles axés sur les ressources et la demande de matières premières.

L'analyse permet de formuler trois séries de recommandations pour l'écosystème français de la modélisation, qui peuvent probablement s'appliquer aussi à d'autres communautés nationales :

- Consolider ou à approfondir les éléments déjà couverts par le processus de modélisation. Il peut s'agir, par exemple, d'organiser un dialogue entre les outils et modèles existants (convergence ou interfaçage des unités fonctionnelles, intégration plus systématique de tous les leviers identifiés), d'améliorer le couplage et le bouclage des outils existants lorsque cela semble facile à mettre en œuvre, de mieux couvrir le parc immobilier ou d'aller au-delà de la barrière de 2050.
- Renforcement de certaines dimensions de la modélisation, qui semblent mal couvertes aujourd'hui mais pour lesquelles une meilleure couverture semble techniquement réalisable. Il s'agit, par exemple, de remédier au manque apparent de capacité de modélisation dans le secteur immobilier (changements dans les services immobiliers, valeurs immobilières, etc.), de développer des modèles capables de traiter un niveau plus élevé de diversité sociale ou territoriale, ou de prendre en compte des impacts quantifiables qui ne sont pas encore couverts (par exemple, la gestion de l'eau) ou qui sont mal intégrés (par exemple, les impacts sur la santé).
- La troisième série de recommandations concerne des questions plus ouvertes, dont la modélisation reste largement à développer dans le cadre d'une approche prospective plus large. Il s'agit par exemple de coupler les approches entre la réduction de l'impact climatique (bien couverte), la consommation de matériaux (relativement couverte) et l'eau et la biodiversité (à couvrir), ou de renforcer la capacité des modèles à refléter les chocs internes ou externes prévisibles sur les données d'entrée qu'ils utilisent (démographiques, économiques, climatiques...).

ABSTRACT

Our ability to adequately project the evolution and use of the building stock is key to reaching carbon neutrality by 2050, and, more broadly, to decrease its environmental impacts. The models used in this field are thus central to establish pathways. While a large range of models has long been developed in France to support such strategic environmental policies, no review of the modelling ecosystem existed. This study presents an analysis of the existing French ecosystem of models related to the building sector. Based on interviews with model developers, four original cartographic views of the ecosystem, and two workshops, it covers 45 (+3) models or tools developed by a wide array of research institutes, public bodies, private consultancies and NGOs.

The work is structured around 4 cartographies that aim at answering the following questions:

- Tools and models: how do the models operate? What is their perimeter, calculation methods and philosophy, and outputs?
- Fields and Parameters: what are the building blocks models rely on? How do they describe the reality they aim to document? Which items and parameters are they using and what relations between them do they explore?
- Chains and Loops: what are the links between existing models and the nature of these links? Can they work as an ecosystem?
- Questions and Issues: in the face of the main identified questions raised by the building / real estate transition, what are those that current models seem to poorly address, if not at all?

Analysis of the French modelling ecosystem on buildings show that models representing the energy-building nexus form the backbone of the ecosystem and enable to capture a wide array of technical and economic challenges (electrification, job creation...), together with an emerging set of models focusing on resources and the demand for raw materials. However, the study clearly points to needs for further developments.

The analysis enables to draw three main set of recommendation for the French modelling ecosystem, which may also be relevant for other national communities:

- The first set of recommendation consists in consolidating or deepening elements already covered by the modelling process. This could include, for instance, organising a dialogue between existing tools and models (convergence or interfacing of functional units, more systematic integration of all identified levers), improving coupling and looping of existing tools where this seems easy to implement, better covering the building stock, or going beyond the 2050 barrier.
- The second set of need is that of reinforcing certain dimensions of modelling, which appear to be poorly covered today but for which better coverage seems technically achievable. This includes, for instance, dealing with the apparent lack of modelling capacity in the real estate sector (changes in real estate services, property values, etc.), developing models that are able to deal with a higher level of social or territorial diversity, or taking into account quantifiable impacts not covered yet (i.e. water management) or poorly integrated (i.e. health impacts).
- The third set of recommendation concerns more open-ended issues, the modelling of which remains largely to be developed as part of a broader forward-looking approach. This, for example, includes coupling of approaches between climate impact reduction (well covered), materials consumption (relatively covered) and water and biodiversity (to be covered), or strengthening the ability of models to reflect foreseeable internal or external shocks to the input data they use (demographic, economic, climatic...).

1. Objectif de l'étude

La montée des préoccupations relatives à la transition écologique a suscité au fil des dernières décennies le développement de nombreux travaux de modélisation destinés à nourrir la réflexion prospective et l'élaboration de stratégies de nombreux acteurs. C'est le cas en particulier dans le secteur du bâtiment. La question peut dès lors se poser de savoir dans quelle mesure cette évolution permet de couvrir ou non l'ensemble des besoins associés à la prospective de la transition du secteur du bâtiment et de l'immobilier, et comment ces besoins pourraient, si nécessaire, être mieux couverts.

1.1. Contexte

La transition écologique, au sens d'une transformation de nos modes de consommation et de production pour les rendre plus soutenables, est de plus en plus reconnue comme un impératif à travers des objectifs de long terme tels que la neutralité carbone (zéro émissions nettes de gaz à effet de serre) ou des principes tels que le Zéro artificialisation nette (conservation des surfaces non artificialisées). Les bâtiments, en tant que lieu d'une grande partie de nos activités productives aussi bien que consommatrices, sont nécessairement au cœur de cette transition. Qu'il s'agisse de leur valeur économique, financière et d'usage, de leur empreinte écologique et géographique, de leur rôle dans l'organisation de nos modes de vie ou des problèmes d'accès au logement ou de précarité, les enjeux associés à l'évolution des bâtiments sont multiples. Parallèlement, l'inertie inhérente à la gestion du stock de bâtiments implique, au regard de l'objectif de transition écologique, que cette évolution s'inscrive dans des orientations claires, voire fasse l'objet d'une forme de planification.

Le secteur du bâtiment (davantage que celui de l'immobilier...) est sans doute celui, avec le secteur de l'énergie (qui bénéficie traditionnellement d'une attention plus forte et plus soutenue pour l'offre que pour la demande dans les scénarios et dans les politiques publiques), dont la modélisation et la vision prospective sont les plus poussées. La capacité de modélisation appliquée à ce secteur, inscrit dans des scénarios plus globaux ou traité de façon spécifique, permet de construire des diagnostics et des trajectoires prospectives permettant à la fois d'explorer la mise en œuvre des différents leviers de transition et les nombreuses implications environnementales, économiques et sociales associées. Pour autant, force est de constater que beaucoup de questions de cohérence et de complétude se posent encore. Il est donc nécessaire de s'interroger sur les forces et faiblesses de la capacité de modélisation et de construction prospective actuelle, sur les priorités et sur les pistes de progrès.

La bonne information des politiques publiques et des stratégies d'acteurs sur l'évolution du secteur du bâtiment et de l'immobilier constitue ainsi l'un des enjeux essentiels de la prospective de la transition écologique. Compte tenu de l'importance de facteurs techniques tels que la consommation d'énergie ou de matériaux associée à la vie des bâtiments, cette prospective a fait appel depuis plusieurs années à un effort croissant de modélisation. Ce développement, parfois foisonnant, n'a que partiellement été organisé et coordonné : il n'y avait pas de raisons qu'il le soit davantage, mais il est ainsi devenu difficile pour les différents acteurs concernés, y compris institutionnels, de garder une vision globale sur la capacité de modélisation et son adéquation aux besoins de la prospective. C'est cette dimension qu'entend explorer la présente étude.

1.2. Objectif de l'étude

La nécessité d'une vision de moyen-long terme sur l'évolution du parc bâti dans le cadre de la stratégie française énergie climat, afin qu'elle soit compatible avec l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 tout en intégrant les enjeux d'adaptation au changement climatique et l'ensemble des enjeux de soutenabilité associés aux bâtiments et à leur insertion dans notre environnement et dans notre économie, passe fondamentalement par la construction, la mise en partage et la sélection de scénarios qui reposent elles-mêmes en partie au moins sur des outils de modélisation. La question se pose dès lors de la capacité ou de la suffisance des outils de modélisation existants pour fournir, à différentes échelles et pour différents acteurs, tous les éléments nécessaires à l'élaboration de scénarios permettant d'informer les décisions.

Dès lors, le parti pris de l'étude consiste à considérer qu'il existe, même s'il n'est pas explicitement organisé ni même identifié comme tel, un « écosystème » de la production prospective du secteur du bâtiment et de l'immobilier, au sens d'une communauté informelle de développeurs d'outils, de producteurs de trajectoires et de scénarios et d'utilisateurs s'appuyant sur un appareillage divers de modélisation de la transition appliqué à ce secteur (cf. figure 1). Dans cette optique, il s'agit d'abord

d'établir une forme de recensement de l'existant en matière de modèles et de porteurs d'outils de diagnostic, de prévision et de prospective relatifs au bâtiment et à l'immobilier.

L'idée est alors de croiser ce recensement avec une analyse des enjeux méthodologiques associés à une pleine intégration de l'ensemble des objectifs de soutenabilité dans les trajectoires de transition pour le bâtiment et l'immobilier, afin d'identifier les forces et les éventuelles faiblesses. L'objectif est également de se servir du support de cette analyse pour stimuler, via des échanges bilatéraux et des ateliers collectifs avec des porteurs de modèles, d'outils et de démarches prospectives, une dynamique de partage de ces enjeux et de réflexion sur d'éventuelles voies de progrès.

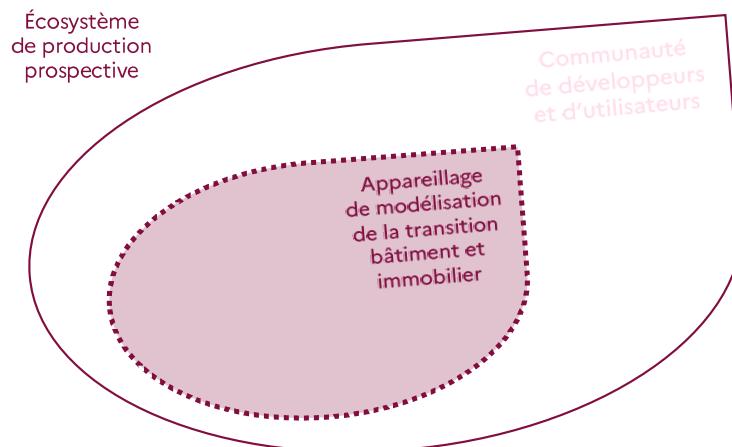


Figure 1 – Notion « d'écosystème » de la production prospective du secteur du bâtiment et de l'immobilier

Dans cet esprit, l'objectif de l'étude est de :

- **dresser un état des lieux des capacités de modélisation françaises sur le bâtiment et l'immobilier** au sens large (quelles organisations ? quels modèles ? quels thèmes et/ou leviers d'action de la transition écologique couverts ? ...);
- analyser dans quelle mesure le corpus de modèles actuels permet, ou non, de couvrir le champ de la transition du bâtiment et de l'immobilier. Il s'agit de **mieux documenter les manques actuels** ;
- **partager cet état des lieux avec les acteurs de cette modélisation**, mobiliser les organisations qui opèrent les modèles pour leur permettre de mieux se connaître et travailler ensemble à l'avenir ;
- **formuler des recommandations pour la modélisation** pour permettre une meilleure modélisation de la transition dans le futur.

Bien que la méthode implique d'analyser les caractéristiques de nombreux outils et leur utilisation, cette étude n'a pas pour vocation à émettre un avis sur la qualité des modèles ni sur la pertinence ou non du positionnement de chacun au sein de l'écosystème de modélisation.

1.3. Contenu du rapport

Le rapport présente d'abord une présentation de la méthode utilisée pour identifier et analyser les outils de modélisation existants, puis un résumé de l'analyse outil par outil, avant de proposer une analyse croisée à partir de cartographies de l'écosystème de modélisation :

- la première partie (**chapitre 2**), consacrée à l'explication de la méthodologie et de son intention, rappelle le périmètre thématique dans lequel s'inscrit cette étude, et précise la vision du rôle des outils de modélisation sur laquelle elle s'appuie. Elle indique ensuite comment ont été construites les différentes étapes de la démarche, depuis le choix des outils et la réalisation des entretiens à l'établissement de différentes cartographies du champ de modélisation analysé, puis à leur mise en discussion dans le cadre d'ateliers, sans oublier la réalisation de fiches détaillées par outil, compilées en annexe ;
- dans une deuxième partie, on s'attache d'abord à présenter la logique et la structure de chacune des quatre cartographies retenues (**chapitre 3**), puis les modèles (**chapitre 4**), les différents outils, modèles à proprement parler ou démarches analysés faisant l'objet d'un résumé, et d'une analyse plus ou moins détaillée de son positionnement vis-à-vis des différentes cartographies. Au total, 45 modèles, très divers dans leur périmètre, leur approche, leur portée et leur portage sont ainsi présentés, avec pour trois

d'entre eux, s'agissant d'outils de l'ADEME, deux versions présentées dans le cadre d'une évolution en cours des outils concernés ;

- la troisième partie présente l'analyse générale de l'écosystème tirée des échanges, des cartographies et des ateliers. Elle se consacre d'abord à la restitution de l'analyse quantitative et qualitative des quatre cartographies (**chapitre 5**), puis restitue les réflexions partagées sur la question d'une communauté de la prospective du bâtiment et de l'immobilier (**chapitre 6**) ;
- Pour finir, un ensemble de conclusions et recommandations à destination de la communauté, s'appuyant sur les éléments partagés lors des ateliers et d'une restitution, est proposé (**chapitre 7**).

2. Méthodologie

Le champ d'application de l'étude est aussi vaste que difficile à circonscrire. D'une part, les notions mêmes d'outil, de modèle, de développeur ou d'utilisateur, de trajectoire ou de scénario sont difficiles à définir de façon claire et partagée, tout en revêtant dans la pratique une grande hétérogénéité. D'autre part, le développement de la prospective relative à la transition écologique du secteur du bâtiment et de l'immobilier fait l'objet d'un double foisonnement, à la fois du point de vue de l'étendue et de la diversité des enjeux et du point de vue de la multiplication des outils. Cette section explique comment s'est construite et a été déroulée une méthodologie visant à saisir la diversité et la complexité de ce champ pour en tirer, au terme d'une analyse de nature cartographique, différents enseignements et quelques recommandations.

2.1. Périmètre thématique

La prospective de la transition énergétique pour le secteur des bâtiments ne saurait se réduire, même si cette dimension joue un rôle central dans la réflexion et dans les efforts de modélisation, à celle de l'évolution de la consommation d'énergie dans les bâtiments et des émissions de gaz à effet de serre associées. Les bâtiments sont, par nature, des objets essentiels dans notre rapport au territoire, notre empreinte environnementale, nos activités productives et sociales et notre économie. Aussi, l'avenir du secteur du bâtiment et de l'immobilier ne se jouera pas que dans sa performance énergétique : toute vision prospective cohérente de la transition doit permettre, par des moyens de modélisation ou d'autres, de se saisir de multiples autres dimensions.

Dans cet esprit, le périmètre thématique de l'analyse menée dans cette étude est celui de la démarche prospective Imaginons Ensemble les Bâtiments de Demain coordonnée par l'ADEME et le CSTB. Cette dernière a identifié 22 facteurs clés (voir figure 2) dont elle juge certain qu'ils auront un impact sur l'évolution du secteur, mais dont l'évolution est incertaine. Ces facteurs, regroupés dans quatre grandes catégories, permettent d'établir un premier panorama des paramètres que doit intégrer, pour apporter un éclairage utile et cohérent, la prospective du bâtiment et de l'immobilier.



Figure 2 – 22 facteurs prospectifs de la démarche Imaginons Ensemble les Bâtiments de Demain

C'est à partir de ces facteurs¹, dont un bref résumé est proposé ci-après, que le cadre de la recherche d'outils et de modèles à été posé.

Facteurs prospectifs pour le bâtiment et l'immobilier

La première catégorie de facteurs prospectifs concerne plutôt des éléments de **contexte**, au sens d'évolutions extérieures au secteur du bâtiment et de l'immobilier mais structurantes de sa dynamique :

01. Démographie :

La démographie française est marquée par un ralentissement du rythme de sa croissance et par une évolution du poids respectif des différentes classes d'âge. L'évolution du nombre d'habitants comme l'hypothèse d'un vieillissement plus ou moins marqué ont des conséquences sur le volume global de demande adressé aux bâtiments ainsi que sur la nature des différents besoins.

02. Répartition à l'échelle nationale :

Après une forte urbanisation, prolongée par une forme de métropolisation, la dynamique de répartition de la population sur le territoire semble aujourd'hui tiraillée entre des évolutions contrastées. En fonction de cet équilibre, on peut s'orienter vers une poursuite du renforcement des métropoles, avec en corollaire un décrochage territorial, vers une forme de métropolisation plus équilibrée et bien distribuée sur le territoire, ou vers un équilibre territorial repartant du local.

03. Répartition à l'échelle locale :

Au niveau plus local, les tendances au national se sont accompagnées d'une périurbanisation croissante et d'une forme de désertification de territoires ruraux, que des tendances nouvelles comme le télétravail ou l'impact des crises peuvent remettre en question. Différentes visions, depuis la ville « centre de commandement » centralisant toujours plus les activités à l'exode urbain, en passant par l'idée d'un plus grand nomadisme favorisé par le numérique ou l'organisation des activités autour de quartiers denses et multifonctionnels peuvent entrer en concurrence.

04. Numérique :

Le développement du numérique, marqué par le développement d'activités et d'outils connectés et susceptible d'accélérer encore avec l'émergence de l'intelligence artificielle, occupe une place prépondérante dans l'économie et, de plus en plus, dans les modes de vie. Porté par des acteurs privés d'une puissance considérable, il soulève des questions sur sa gouvernance et sur ses limites, du point de vue des libertés et des impacts environnementaux et sociaux, ouvrant la voie à des évolutions contrastées : la poursuite d'un développement débridé, l'émergence d'un numérique responsable, voire la recherche d'une sobriété numérique.

05. Ressources économiques des ménages :

Dans un registre très différent, l'évolution du pouvoir d'achat des ménages et du niveau d'inégalités au sein de la société déterminent celle des besoins et de la capacité à agir – comme le développement ces dernières années de familles monoparentales en situation de pauvreté. Le progrès ou le recul respectif des revenus et des inégalités dessinent, lorsqu'on les croise, quatre évolutions possibles : stagnation séculaire et inégalitaire (moins de revenus, plus d'inégalités), fracture sociale (plus de revenus, plus d'inégalités), solidarité dans la crise (moins de revenus, moins d'inégalités) et croissance économique inclusive (plus de revenus, moins d'inégalités).

06. Risques systémiques :

Si les risques auxquels est exposée notre société ne constitue pas une nouveauté, c'est leur conjonction et leur ampleur qui crée aujourd'hui un contexte inédit. Entre les risques géopolitiques, de crise économique, les risques sanitaires avec le retour de pandémies, les risques industriels et les nouveaux risques technologiques (numérique...), et les risques environnementaux extrêmes (changement climatique, effondrement de la biodiversité), les conditions de gestion de ces risques, de l'anticipation à l'atténuation et à la gestion de crise, constituent un cadre incontournable de réflexion.

La deuxième catégorie regroupe des facteurs susceptibles d'influencer la **demande** adressée au secteur du bâtiment et de l'immobilier :

07. Occupation des logements :

Entre l'augmentation du nombre de logements en résidence secondaire ou vacants, l'individualisation des logements et la baisse tendancielle du taux de cohabitation par foyer, le niveau d'occupation des logements tend à diminuer, bien que des situations de suroccupation subsistent et qu'une population sans domicile se développe. Les pratiques de colocation, le développement du télétravail et l'émergence du concept de sobriété immobilière viennent interroger cette évolution. La poursuite de la tendance passée à l'augmentation des surfaces autour d'un principe de réponse individuelle à la demande d'espace, le meilleur ajustement des logements aux besoins de

¹ Pour plus de détails sur ces facteurs, voir le site <http://www.batimentdemain.fr>

chacun, voire le développement des espaces partagés peuvent fortement influencer la demande en surface habitable.

08. Occupation du non-résidentiel :

De même, la tertiarisation de l'économie française, la servicialisation des modes de vie et le développement de la société de consommation, des loisirs et du temps libre a conduit ces dernières décennies à une forte évolution de la demande en bâtiments non résidentiels, avec une baisse des besoins en locaux industriels mais une forte hausse du tertiaire, notamment des bureaux et du commerce. Les mutations du travail tertiaire et du commerce, ainsi que le vieillissement de la population, remettent en cause ces tendances, ouvrant la voie à une stagnation, à une véritable crise du tertiaire, avec une forte augmentation du taux de vacance, ou à de nouvelles dynamiques d'occupation maîtrisée des locaux non-résidentiels.

09. Financement de l'immobilier :

Les conditions de financement des dernières décennies ont permis aux ménages de supporter une hausse des prix immobiliers, au prix d'un accroissement de l'endettement et de l'exclusion d'une partie des ménages, tout en maintenant un mode pérenne de financement du logement social. Dans le tertiaire, des mécanismes solides ont permis le financement de l'extension mais l'évolution de l'appréciation de certains investissements (bureaux, centres commerciaux...) pourrait remettre ces mécanismes en cause. Entre financement facile (taux bas, forte capacité d'endettement), contraint par les marchés, fortement régulé voire en crise, l'impact des évolutions possibles sur les capacités de financement et sur les prix de l'immobilier peut être majeur.

10. Rapport à la propriété :

Encouragée par les pouvoirs publics, la propriété de son logement s'est imposée comme une norme et comme une pratique majoritaire, autour d'une logique de sécurité et de constitution de patrimoine (avec l'inégalité intergénérationnelle qu'elle génère). Mais on assiste à un retour des acteurs institutionnels dans le logement et à l'expérimentation de nouvelles formes de propriété. À l'inverse, les grandes entreprises ont largement privilégié une situation de locataire, mais les évolutions telles que le télétravail et le e-commerce peuvent rendre ce secteur moins attractif pour les investisseurs. Ces évolutions peuvent mener à un monde de propriétaires occupants, au retour à l'immobilier valeur refuge, avec le risque d'une bulle immobilière, à une pénurie immobilière nécessitant une intervention publique, ou encore à l'émergence d'une économie du bâtiment comme service.

11. Les bâtiments et leur environnement :

La tendance lourde des dernières décennies a été celle d'une spécialisation des fonctions des bâtiments, et même des quartiers, conduisant notamment à l'allongement des déplacements pour accéder aux différents services et à l'extension de l'ensemble des réseaux (transports, fluides, communications) nécessaire au support des activités domestiques, tertiaires ou de loisir. De nouvelles tendances apparaissent, entre relocalisation d'activités, multifonctionnalité des bâtiments ou nouveaux concepts tels que la « ville du quart d'heure », autour de l'idée que la flexibilité d'usage et la proximité, plutôt que la spécialisation, sont facteurs d'efficacité. On peut aussi bien projeter un renforcement de la logique de bâtiments monofonctionnels dans des zones dédiées qu'envisager des bâtiments conçus pour être aussi autonomes que possible, notamment sur le plan énergétique, voire imaginer des bâtiments plurifonctionnels générant des services pour leur quartier.

Symétriquement, la troisième catégorie regroupe des facteurs susceptibles d'influencer l'**offre** que le secteur du bâtiment et de l'immobilier pourra proposer en face de la demande :

12. Main d'œuvre du bâtiment :

La filière du BTP, qui occupe environ 1,5 millions de personnes en France, reste assez peu attractive et marquée par la pénibilité d'une grande partie de ses emplois. Elle est confrontée à d'importantes transformations liées notamment aux enjeux environnementaux d'une part, et à l'émergence du numérique d'autre part, auxquels elle cherche à s'adapter même si les dynamiques, du point de vue de la formation par exemple, ne semblent pas encore à la hauteur des enjeux. La filière peut aussi bien redevenir attractive, autour de la valorisation de l'évolution de ses métiers que connaître une véritable crise, ou voir s'opérer une polarisation entre de nouveaux métiers très valorisés et des emplois de manutention ou de déconstruction de moins en moins considérés.

13. Matériaux, produits et équipements :

De très longue date, les bâtiments ont connu une complexification croissante des matériaux entrant dans leur construction, et une multiplication des équipements et produits que leur occupation induit. Parallèlement, les exigences sur l'impact sanitaire, la qualité environnementale ou l'impact en cycle de vie de ces matériaux et équipements se sont continuellement renforcées. Différentes tendances, entre technicisation, circularité et frugalité low-tech s'affrontent, ouvrant la perspective d'évolutions très contrastées des besoins.

14. Filière construction-rénovation :

La filière connaît d'importantes évolutions tant du point de vue de son organisation, avec une multiplication des acteurs et de la sous-traitance, que de son modèle économique, avec une progression relative basse de sa productivité et une transformation de la chaîne de valeur (au profit notamment de produits industriels de plus en plus sophistiqués), ainsi qu'une augmentation continue des exigences, se portant de plus en plus sur les résultats plutôt que les moyens. Elle peut connaître une productivité stagnante ou au contraire voire celle-ci s'améliorer via

une meilleure organisation collective, et s'organiser plutôt autour d'une importance croissante des métiers de coordination de la mise en œuvre ou au contraire d'industrialisation, avec des répercussions importantes sur la nature de son offre.

15. Gestion de l'obsolescence :

Les politiques de gestion de l'obsolescence des bâtiments se sont toujours reposées sur la vacance, la construction et le changement d'usage pour adapter le parc bâti à l'évolution des besoins. Aujourd'hui, le phénomène d'obsolescence est susceptible de s'accélérer, du fait de la combinaison d'une évolution rapide des besoins, dans le tertiaire notamment, et de la montée des exigences de performance énergétique. L'évolution démographique, avec la perspective d'un vieillissement, et les enjeux d'adaptation aux impacts du changement climatique constituent des facteurs d'obsolescence supplémentaires. L'équilibre entre activités de construction et de rénovation / réhabilitation peut se maintenir, se déplacer vers une politique plus rapide de rénovation et de reconversion, ou au contraire vers un « nouvel esprit haussmannien », privilégiant la construction de bâtiments neufs plus adaptés en consentant à la perte de valeur des bâtiments obsolètes.

16. Qualité d'usage des bâtiments :

Les exigences apportées au bâtiment par les usagers font à la fois l'objet d'une demande croissante de sécurité, de confort et de performance environnementale, d'une attente de plus en plus forte d'adaptation aux besoins individuels et de personnalisation, et d'une normalisation croissante de la qualité. Le maintien d'une offre immobilière relativement peu flexible et standardisée, ou le gain en flexibilité par une plus grande mobilité immobilière des occupants ou par une plus grande flexibilité de configuration et d'usage dans les bâtiments sont trois orientations possibles.

17. Services immobiliers :

On assiste à une évolution importante des services immobiliers, qu'il s'agisse de l'externalisation des fonctions de property ou facility management dans le grand tertiaire, de l'offre de service aux occupants dans le résidentiel ou le petit tertiaire, ou du développement d'immobilier spécialisé (résidences senior, co-working...). Les exigences de performance, énergétique notamment, font également émerger de nouveaux services liés aux fonctions de gestion technique. Ces évolutions ouvrent la voie à l'apparition de nouveaux acteurs comme de marchés de niche, prenant une place plus ou moins importante aux côtés des acteurs porteurs des services traditionnels (vente, conseil immobilier...), et plus ou moins intégrée avec eux.

Enfin, la quatrième catégorie porte sur les facteurs liés aux **politiques** publiques dont le champ impacte directement le secteur du bâtiment et de l'immobilier, au sens des objectifs qu'elles lui imposent et des conditions de mise en œuvre qu'elles lui proposent :

18. Gouvernance politique :

Historiquement centralisé, le système de décision français connaît un rééquilibrage sous l'effet des mouvements de décentralisation et de déconcentration. Il reste toutefois marqué par un empilement complexe des échelles de décision, renforcé par la dimension européenne, et soumis à une demande croissante de la population de la population d'être plus étroitement associée aux décisions. Entre recentralisation, fédéralisme, localisme ou « contractualisme » à tous les niveaux (action concertée entre les différentes échelles), le cadre d'action public dans lequel se projeter peut être très varié.

19. Politique environnementale :

Apparue il y a un demi-siècle, la politique environnementale, dans ses différentes composantes, a pris un rôle croissant, avec l'émergence à côté d'enjeux de pollutions locales de problématiques globales telles que le changement climatique. Elle est devenue un enjeu central de l'activité politique et l'objet d'une planification à long terme de l'action publique. Plus récemment, les stratégies de transition écologiques se sont enrichies d'un enjeu portant sur les politiques d'adaptation. Différentes dynamiques sont possibles, comme le basculement vers un soutien massif à l'action environnementale et des politiques plus volontaristes, en rupture avec le modèle actuel, ou au contraire l'accroissement de fractures autour des politiques environnementales et la délégitimation de l'action collective dans ce domaine, voire le renoncement aux politiques d'atténuation au profit d'une stratégie d'adaptation.

20. Politique du logement :

La politique du logement, qui combine historiquement renforcement de l'offre de logement et facilitation de l'accès des ménages aux logements, intègre de plus en plus des objectifs de lutte contre l'insalubrité et de qualité des logements. Elle se heurte toutefois de plus en plus à la diversité des situations territoriales, à l'accroissement du nombre de ménages démunis, et aux distorsions de marché. Des questions telles que l'adaptation des politiques nationales aux situations territoriales, la fluidification du marché, ou la nécessité de politiques plus ciblées socialement se posent.

21. Politique de l'urbanisme :

La politique d'urbanisme a longtemps été portée par une politique d'aménagement du territoire élaborée au niveau national et déclinée dans les territoires. Avec la décentralisation, elle fait l'objet d'une tension entre les niveaux de décision, compliquée par l'apparition d'acteurs privés puissants (applications liées à la mobilité), la demande

croissante de participation du public, et la prise en compte d'impératifs de long terme associés aux enjeux environnementaux. Cette complexité conduit à une relative perte de vision, au profit de stratégies plus réactives qu'anticipatives. Selon qu'un cadre clair en termes d'objectifs de la politique d'urbanisme émerge ou non, et que des conditions adaptées pour sa mise en œuvre coordonnée entre l'État et les collectivités sont mises en place ou non, les dynamiques d'urbanisme peuvent connaître des orientations très différentes.

22. Politique technique :

La politique technique, qui repose pour l'essentiel sur une approche normative, encadre notamment les matériaux et les règles constructives mis en œuvre dans le secteur du bâtiment, les enjeux de performance énergétique et environnementale des bâtiments, et les performances des équipements qu'ils abritent. La diversité des enjeux tend à complexifier et à alourdir les règles et compliquer leur mise en œuvre. Les dynamiques en cours peuvent aboutir à un patchwork croissant de règles de plus en plus difficilement applicables ou trouver plus de cohérence et d'efficacité vis-à-vis des performances environnementales et sociales recherchées, sur le neuf d'une part et sur l'amélioration et la rénovation de l'existant d'autre part.

2.2. Rôle des outils de modélisation

L'ensemble de ces facteurs prospectifs, des questions qu'ils soulèvent et des incertitudes associées à leurs réponses constituent autant de points d'entrée pour la prospective, au sens de la construction de scénarios projetant, dans un cadre de référence donné, une trajectoire cohérente pour le secteur du bâtiment et de l'immobilier. Ces scénarios doivent aujourd'hui, pour assurer cette cohérence, décrire autant que possible cette trajectoire, appliquée au stock physique de bâtiments et à son évolution, dans plusieurs dimensions :

- Sur le plan physique, il s'agit d'abord de la **trajectoire énergétique et de la trajectoire associée en termes d'émissions de gaz à effet de serre**, qui sont au cœur de l'objectif de transition énergétique, mais aussi de la **trajectoire du point de vue de l'usage des sols**, en lien avec l'objectif de zéro artificialisation nette (ZAN). D'autres aspects, comme l'empreinte en matériaux de l'évolution du secteur, peuvent être intégrées à cette trajectoire ;
- **Cette trajectoire doit être cohérente avec une trajectoire immobilière**, décrivant parallèlement à l'évolution des bâtiments celle du secteur immobilier, au sens de la valeur des biens, des services associés, et de la capacité des propriétaires et occupants. De même, cette trajectoire doit être caractérisée du point de vue de ses implications économiques et sociales ;
- **Elle doit également faire sens du point de vue des modes de vie**, dans lesquels l'évolution des bâtiments joue évidemment un rôle central ;
- D'autres aspects de la trajectoire, en lien avec les différents enjeux, questionnements et facteurs prospectifs, peuvent être pertinents à caractériser.

C'est donc en tant que matrice de passage entre la prise en compte de ces facteurs prospectifs et la production de scénarios que nous envisageons la caractérisation des modèles et outils considérés dans cette étude. Il est bien entendu ici que la modélisation n'est pas le seul support de la prospective, mais elle en constitue, sur un sujet aussi technique, multi-dimensionnel et largement quantifiable que la transition écologique du secteur du bâtiment et de l'immobilier, un socle indispensable.

Cette approche nous fournit, avant d'étudier les différents outils identifiables et d'explorer les dimensions et les limites de ce champ, une définition opérationnelle du champ que nous considérons comme celui de la modélisation au service d'une prospective de la transition du secteur du bâtiment et de l'immobilier. Ainsi, la vision d'ensemble que nous développons ici des outils et démarches de modélisation du secteur du bâtiment et de l'immobilier couvre l'**ensemble des outils permettant une projection quantifiée de l'évolution de ce secteur, dans l'une ou plusieurs de ces dimensions, et contribuant ainsi à la prise en compte des différents facteurs prospectifs en jeu pour alimenter la production de scénarios**.

Si l'on place le stock de bâtiments, au centre, les outils et démarches de modélisation sont donc des instruments de production de trajectoires quantifiées, au service de visions prospectives ou d'exercices de planification, qui ont tous en commun de saisir, de façon spécifiquement appliquée au secteur du bâtiment, voire à une partie du parc ou dans le cadre d'une approche plus globale, certaines dimensions de ce stock pour en projeter l'évolution, comme illustré par la figure 3.

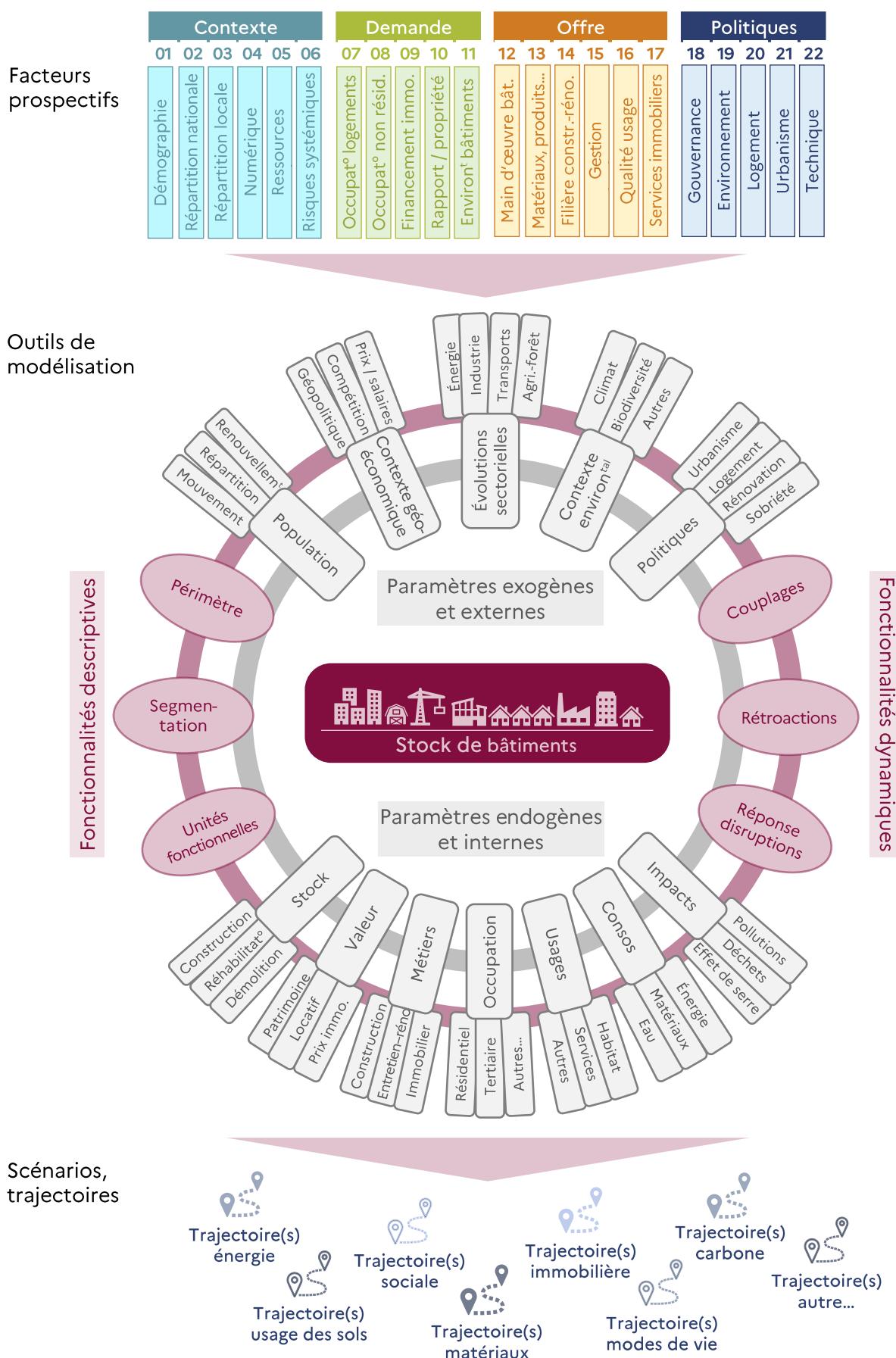


Figure 3 – Schéma de principe du rôle des outils de modélisation pour construire les trajectoires de transition du secteur du bâtiment et de l'immobilier

Pour faire ce travail, les outils et démarches de modélisation au sens de la présente étude obéissent tous, dans leur grande diversité, à la même logique globale, que nous décrivons pour la suite de l'analyse de la façon suivante :

- Ils cherchent à apprêhender les différents facteurs en jeu en opérant une série de paramètres, que ceux-ci constituent des données d'entrée, des éléments de calcul intermédiaire ou des résultats en sortie ;
- Ces paramètres se répartissent en deux catégories. Il s'agit pour la première de **paramètres exogènes**, non pas au sens du modèle mais de leur caractère extérieur au secteur du bâtiment lui-même, tels que les éléments de contexte démographique, international, économique ou environnemental, les politiques publiques ou l'évolution des autres secteurs d'activité. La seconde catégorie regroupe les **paramètres endogènes**, là encore pas nécessairement au sens de leur intégration dans les modèles eux-mêmes, mais de leur nature interne au secteur du bâtiment et de l'immobilier, comme l'état du stock de bâtiment, sa valeur, les métiers du secteur, et les usages, consommations et impacts liés à leur occupation. Les paramètres représentés sur la figure 3 ne prétendent ni à l'exhaustivité ni à la représentativité, mais une liste indicative des paramètres exogènes ou endogènes tels qu'observés dans le cadre d'un premier balayage des modèles ou attendus dans le cadre d'une première réflexion sur les éléments à prendre en compte ;
- Pour manipuler ces différents paramètres, les outils de modélisation mettent en jeu des fonctionnalités, qui peuvent elles-mêmes être divisées en deux catégories. Les premières relèvent du **registre descriptif**, c'est-à-dire du choix du périmètre sur lequel le modèle opère, des unités fonctionnelles qu'il manipule à l'intérieur de ce périmètre (telles que des ménages, des logements, des systèmes de chauffage...), et des segmentations qu'il introduit à l'intérieur de ce périmètre. Les secondes sont plutôt des **fonctionnalités dynamiques**, relevant de la manière dont les modèles mettent les différentes unités fonctionnelles qu'ils manipulent en relation, qu'il s'agisse de les combiner, de les coupler ou encore d'introduire des rétroactions ou des réponses aux disruptions. Les intitulés des fonctionnalités dynamiques représentées sur la figure 3 sont donnés à titre indicatif, d'autres types de manipulation calculatoire pouvant être envisagés.

Formulée dans ces termes, la problématique centrale de l'étude est de vérifier dans quelle mesure les facteurs prospectifs sont effectivement susceptibles d'être traités par les modèles, tant du point de vue des paramètres qu'ils couvrent que des fonctionnalités qu'ils mettent en jeu, pour répondre aux questions qui se posent du point de vue de la cohérence et de la complétude des visions prospectives qu'ils permettent de construire, en regard des enjeux.

2.3. Détail de la méthodologie

Une fois ce périmètre posé, et face au foisonnement des enjeux et des outils, la méthodologie déployée a consisté à mêler une approche de nature plutôt exploratoire, visant à développer de proche en proche une connaissance des modèles s'appuyant, dans une majorité de cas, sur des entretiens avec leurs porteurs ou développeurs avec une approche plus conceptuelle, visant à développer une logique de cartographie des outils, tout en veillant à partager celle-ci avec les concepteurs ou utilisateurs de modèles. Les éléments de méthodologie qui en découlent ont décrits dans cette section de manière séquentielle sous forme d'étapes, mais la réalisation de l'étude s'est basée sur un aller-retour entre les différentes tâches.

2.3.1. Entretiens et sélection

La première étape a consisté à identifier les modèles utilisés dans le domaine de la transition énergétique du bâtiment en France et à mieux les comprendre. En cohérence avec l'approche précisée ci-dessus, on s'est intéressé plus précisément aux outils et démarches pouvant être assimilés à un modèle, défini comme « le support "mathématique" [d'un] scénario(...) : un ensemble d'équations destinées, sur la base d'hypothèses d'entrée et de processus de résolution, à représenter le fonctionnement d'un système réel (le climat, l'économie d'un pays...) et son évolution au cours du temps » (The Shift Project, 2019), le système considéré étant dans le cadre de cette étude le parc de bâtiments, pris dans son intégralité ou partiellement, et traité isolément ou dans un périmètre économique ou technique plus large.

Ainsi, n'ont été inclus dans l'étude que des modèles qui englobent un parc immobilier (les modèles qui effectuent des simulations thermiques pour un seul bâtiment étaient hors champ), et les outils qui permettent, au-delà d'une caractérisation de la situation existante, une projection à l'échelle nationale (ou une projection à une échelle plus fine pouvant intéresser l'analyse prospective à l'échelle nationale). Les modèles opérant à une maille plus grande que l'échelle nationale (Europe, Nord global, monde...) n'ont

pas été explorés, bien que certains puissent présenter un intérêt identifié ; à l'autre extrémité, les modèles locaux n'ont pas été intégrés dans l'étude (même si certains peuvent justifier d'un lien direct avec un modèle national, qui est dans ce cas l'outil considéré). Il faut également souligner que les bases de données, bien qu'elles soient de plus en plus riches et complexes, n'ont en vertu de cette définition pas été intégrées au périmètre des outils examinés ; elles ont toutefois bien été considérées en termes d'entrée pour les modèles.

Cette première étape a été réalisée, après une première analyse des outils portés par l'ADEME, par l'Association et l'Institut négaWatt ou par Enertech, par le biais d'un **processus itératif d'entretiens avec les développeurs ou opérateurs de modèles**, au cours desquels il leur a été demandé, en plus de présenter leur(s) modèle(s), de désigner le cas échéant d'autres modèles susceptibles d'être intégrés dans l'étude. Ceux-ci ont ensuite été examinés, sauf lorsqu'ils semblaient trop similaires ou redondants avec d'autres modèles déjà traités ou repérés. Cette démarche a permis, comme illustré par la figure 4, d'élargir progressivement, à partir d'une base mieux connue par les auteurs de modèles appliqués à la prospective énergie-bâtiment, en cherchant à identifier des outils s'inscrivant dans les différentes dimensions repérées sur la base des facteurs prospectifs et des principaux paramètres pré-identifiés.

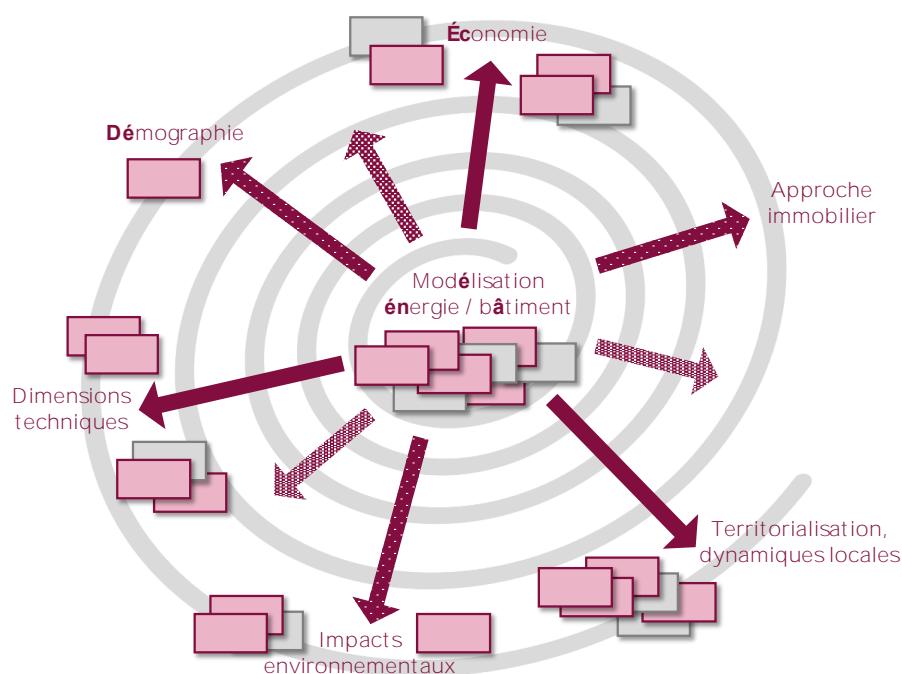


Figure 4 – Démarche exploratoire de repérage et d'analyse des outils et modèles

Cette méthode de sélection de proche en proche présente plusieurs biais possibles. D'un côté, elle conduit à ne pas systématiquement interroger des outils pouvant sembler très similaires à certains déjà analysés dans leur approche et leur fonctionnalité (comme par exemple les outils d'application territoriale déployés par différents bureaux d'études) ; de l'autre, elle peut mener à une sur-représentation ou sous-représentation de certaines approches du fait des phénomènes d'interconnaissance (ou non) entre modélisateurs. Enfin, elle ne permet pas une identification exhaustive de tous les modèles en France, car il est possible que certaines organisations opèrent des modèles en dehors du domaine public. Cependant, les ateliers organisés dans une phase avancée de l'étude ont confirmé que la sélection semble représentative de la diversité des modèles, dans la mesure où les développeurs et les opérateurs en ont connaissance.

Cette méthode a permis au final de sélectionner et de traiter 45 (+3) modèles, divers en termes de nature et de périmètre et représentatifs d'une large palette de porteurs, puisqu'ils sont au total développés par une trentaine d'instituts de recherche, d'organismes publics, de bureaux d'études privés et d'ONG, comme indiqué dans le tableau 1.

	Date	Interlocuteurs	Outil(s)	Porteur(s)
1	16/02/2023	EDF R&D	Modèle demande électrique	EDF R&D
2	21/02/2023	DHUP	OTELO	DHUP / DGALN / Cerema
3	22/03/2023	Rédaction auteurs	ANTONIO	ADEME
4			VIVALDI et Data centers ^a	ADEME
5			USES 2	ADEME
6			MICO	ADEME / CODA Stratégies
7			RENOMAT	ADEME / TBC Innovations
8			CONSOMAT	ADEME / CSTB
9	28/02/2023	CIRED / ENPC	Res-IRF	CIRED / ENPC
10	02/03/2023	Shift Project	Outils PTEF	Shift Project
11			Elioth	Groupement Elioth
12	03/03/2023	Mines Paris	Building Model	Mines Paris
13			SHAPE-Optim	Mines Paris
14	06/03/2023	CGDD	Modèle artificialisation	CGDD
15	07/03/2023	Rédaction auteurs	MODEIRE	ADEME / Association négaWatt
16	07/03/2023	Rédaction auteurs	Modèle SnW	Association négaWatt
17			négaMAT	Association négaWatt
—	08/03/2023	Économiste de la politique du logement		—
—		Économiste de l'immobilier		—
18	09/03/2023	ADEME	Modèle déchets et modèle AFMD ^b	ADEME
19	16/03/2023	CSTB	ZEPHYR	CSTB / ADEME
20			MENFIS	CSTB
21			Décarbo-CSTB	CSTB
22			BTPFlux	CSTB / ADEME
—			Outils divers	CSTB
23	21/03/2023	DGEC	Suite de modèles sectoriels	DGEC
24	23/03/2023	ADEME	Modèle biomasse	ADEME
25	28/03/2023	CGDD	TiTAN	CGDD
26	28/03/2023	POUGET / Carbone 4	Outil étude bâtiment	POUGET Consultant / Carbone 4
27	28/03/2023	Rédaction auteurs	Planiss'Immo	Institut négaWatt
—	29/03/2023	Représentant I4CE		—
28	29/03/2023	Énergies Demain	PROSPER	Énergies Demain
29			Enerter	Énergies Demain
30			Outil cadastral	Énergies Demain
31	30/03/2023	RTE	Amadeus	RTE
32	30/03/2023	Artelys	Modèle demande électrique	Artelys
33			Outils territoriaux	Artelys
34	05/04/2023	INSEE	Omphale	INSEE
35	06/04/2023	ADEME	MatMat et ImpactsConso ^c	ADEME
36	12/04/2023	GRDF / GRTgaz	Outil Perspectives gaz	GRDF
37	12/10/2023	Enedis	Modèle demande électrique	Enedis
38	02/11/2023	Enerdata	EnerMED	Enerdata
39	03/11/2023	Rédaction auteurs	MOSAIC	Enedis
40	—	Rédaction auteurs	ThreeME	ADEME / OFCE
41	—	Rédaction auteurs	Mésange	DG Trésor / INSEE
42	—	Rédaction auteurs	TETE	Réseau Action Climat / ADEME
43	—	Rédaction auteurs	Imaclim-R	CIRED
44	—	Rédaction auteurs	Plateforme R4RE	OID
45	—	Rédaction auteurs	ECLORE	Institut négaWatt

^{a, b, c} – Les analyses de ces modèles, reflétées dans les fiches en annexe, ont évolué pour tenir compte de développements relatifs aux outils correspondants dans les travaux de l'ADEME (voir annexes A6, A7 et A10).

Tableau 1 – Liste des entretiens et de la rédaction par les auteurs de fiches, et répertoire des outils ou modèles couverts par la démarche, par ordre chronologique d'intégration

La limitation est également venue du plafond qu'il a fallu fixer au nombre d'outils analysés, ou du fait que certains d'entre eux ont été identifiés trop tardivement pour pouvoir être pris en compte. On peut par exemple signaler dans ce registre des modèles repérés et jugés potentiellement intéressants qu'il n'a pas été possible de traiter la suite ÉQUITÉE (pour ÉQUilibres Territoriaux - Énergie, Environnement) de GINGER-Burgeap², les travaux menés sur la prospective pour les stratégies territoriales de transition par le groupe AREP³, ou encore le modèle Prometheus (pour Programme de Microsimulation des Energies du Transport et de l'Habitat pour Évaluations Sociales) développé par le CGDD, et qui vise à simuler l'impact social de la fiscalité énergétique⁴.

Chacun des 45 (+3) outils et modèles a fait l'objet d'une analyse basée selon les cas sur (1) un entretien avec un ou des porteurs, complété le cas échéant par des éléments documentaires, (2) une analyse menée en interne pour certains des outils dont l'ADEME, l'Institut négaWatt ou Enertech, ou (3) une lecture de la documentation disponible (voir tableau 1). Les questions posées lors des entretiens, ou instruites via l'analyse bibliographique comprenaient des informations sur le périmètre du modèle, sa philosophie, ses apports et ses résultats, ainsi que des questions plus générales sur les projets ou les besoins en matière de développement. L'information collectée a été formalisée sous la forme de fiches, élaborées selon une trame commune suffisamment souple pour être adaptée à la grande variété des outils ainsi traitées (voir la section 2.3.4., et les fiches en annexe).

2.3.2. Réalisation de cartographies

Parallèlement à la réalisation des entretiens et des analyses documentaires, la réflexion s'est portée sur la structuration d'une cartographie des outils et modèles considérés. Au vu de la définition préliminaire du périmètre de l'étude et des premières informations collectées, il est rapidement apparu que le foisonnement des sujets, des angles d'analyse et des outils étudiés généreraient une complexité telle qu'une cartographie unique, à deux voire trois dimensions ne suffirait pas à la capter. La réflexion s'est dès lors orientée vers l'idée d'une cartographie multiple, dont les volets et leur intention se sont précisés au cours de l'étude.

2.3.2.1. Démarche de cartographie

Pour tenter de saisir l'ensemble des dimensions essentielles à l'analyse, la démarche de cartographie a progressivement été construite en s'appuyant sur deux axes structurants pour la réflexion :

- **Modélisation <---> Prospective :**

Cet axe structure l'articulation entre les outils nécessaires à la construction des trajectoires, qui forment ensemble ce qu'on appelle ici **l'appareillage de modélisation** de la transition du secteur du bâtiment et de l'immobilier, et les questionnements que formule autour de ces trajectoires la **communauté prospective** de développement et d'utilisation de ces modèles ;

- **État des lieux <---> Projection :**

Cet axe porte l'articulation nécessaire entre un constat de la manière dont les modèles opèrent aujourd'hui, donc un état des lieux de leur champ et de leur fonctionnement, et la dimension exploratoire des faiblesses ou des lacunes à combler et des pistes de renforcement, pour projeter des voies d'amélioration.

Le croisement de ces deux axes aboutit, comme illustré par la figure 5, à une logique de **quatre cartographies, très différentes dans leur approche et se voulant complémentaires**.

² Ce programme, disponible depuis 2014, est présenté comme un outil géo-décisionnel destiné à accompagner l'élaboration de stratégies de transition territoriale : avec un diagnostic clé en main, l'élaboration interactive de scénarios prospectifs, et le suivi dans le temps de programmes d'actions. Voir : <https://www.ginger-burgeap.com/en/equitee/>

³ Voir : <https://www.arep.fr/metier стратегии-прогностические-территориальные/>

⁴ Il s'agit d'un outil de microsimulation permettant de simuler les consommations des ménages en combustibles domestiques et les factures correspondantes, inclus l'effet de dispositifs d'aide au paiement des factures énergétiques ou, à contrario, d'une hausse de la fiscalité des énergies fossiles. Voir : <https://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0083851>

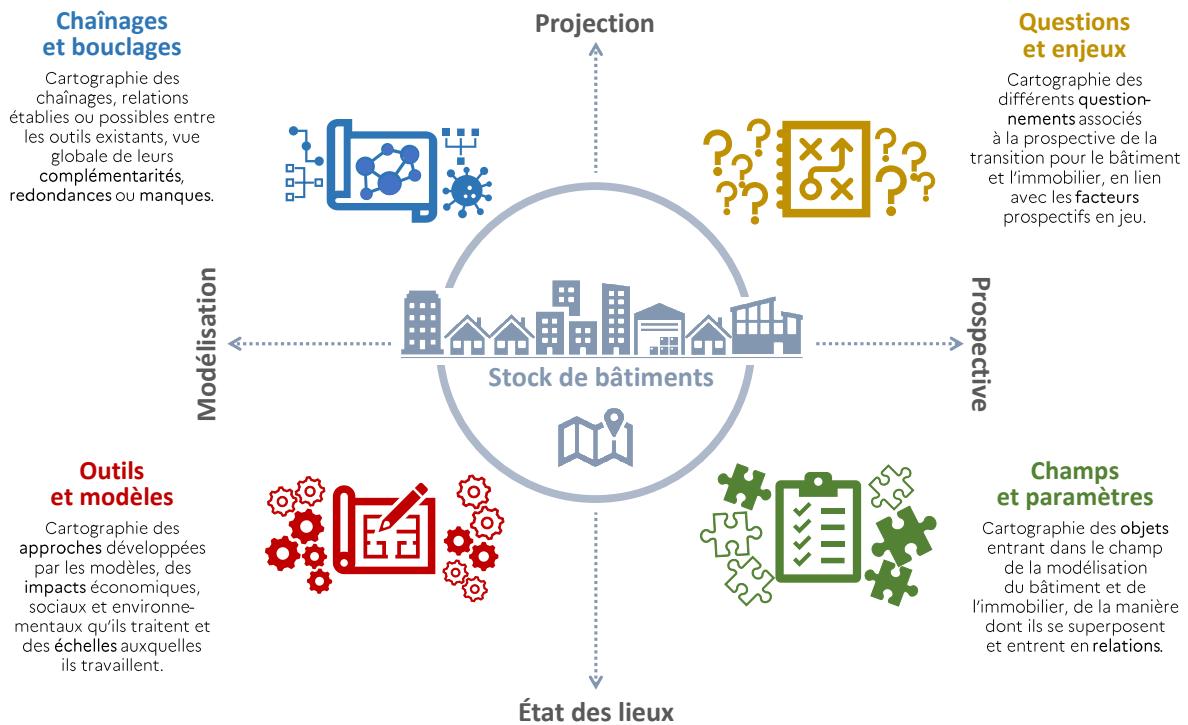


Figure 5 – Schéma de principe de la démarche de cartographie

Avant de préciser l'intention qui a été donnée à chacune d'elles, on peut résumer l'esprit de ces quatre cartographies en précisant comment chacune est orientée par son positionnement vis-à-vis de ces deux axes :

- **Questions et enjeux** se situe clairement du côté de la prospective (à quelles questions les trajectoires produites par la modélisation doivent chercher à répondre, quels enjeux elles doivent couvrir...), et elle est traitée ici dans la dimension projection, c'est-à-dire en se focalisant sur les questions que la modélisation ne couvre pas ou couvre mal, plutôt qu'un inventaire de tout ce qu'elle fait déjà bien voire très bien (aspect qui n'en est pas moins largement capté dans la collecte d'information par ailleurs) ;
- **Champs et paramètres**, qui porte sur les différentes dimensions du bâtiment et de l'immobilier dont traitent ou peuvent traiter les modèles selon les catégories qu'ils mobilisent (bâtiments, ménages, ressources, coûts et prix...) et les relations qu'ils établissent entre eux, se positionne plutôt sur la prospective, au sens où il s'agit davantage de questionner cet aspect sous l'angle des facteurs prospectifs que des techniques de modélisation. Mais cette approche est plutôt centrée dans la démarche sur l'état des lieux plutôt que sur les nouvelles catégories ou relations que les modèles pourraient développer ;
- **Outils et modèles** constitue en quelque sorte son pendant du côté de la modélisation. Il s'agit ici de faire un état des lieux des différents outils actuels, des méthodes de construction des trajectoires qu'ils mobilisent et donc du type de trajectoire qu'ils produisent ainsi que des dimensions auxquelles elles s'appliquent (évolution du parc bâti, consommation d'énergie, etc.) ;
- **Chaînages et bouclages**, enfin, part de cet état des lieux pour se replonger dans une démarche de projection, au sens où il s'agit d'identifier à partir des liens qu'établissent d'ores et déjà certains modèles entre eux quels liens pourraient davantage s'établir entre ces outils ou avec d'autres, dans l'optique de mieux répondre aux questions nouvelles ou mal traitées que fait ressortir la réflexion prospective.

2.3.2.2. Intention des cartographies

La démarche a conduit à un découpage en quatre cartographies, mais celui-ci n'obéit ni à une logique de priorité ni à un ordre prédéterminé : chacune apporte un regard spécifique sur l'ensemble du champ, et c'est ensemble qu'elles doivent permettre d'en saisir l'image. Par conséquent, on les présente ici dans un ordre qui correspond à l'ordre dans lequel elles ont émergé comme approches des différentes dimensions qu'il a semblé utile de capter et dont, au-delà de leur intention initiale, leur concept a été précisé.

Cartographie « Questions et enjeux »



Cette cartographie répond au besoin de clarification de l'enjeu de cette étude, dont l'objectif est d'abord **d'analyser les forces et faiblesses de la modélisation actuelle de la transition du bâtiment et de l'immobilier en regard des questions de cohérence ou de complétude de la prospective menée dans ce domaine**. Le besoin

de l'étude est en partie né du constat qu'un certain nombre de questions importantes sont peu ou mal traitées dans l'appareil de modélisation actuel, et du sentiment que ce nombre grossit à mesure que l'on explore cette problématique. Il s'agit donc ici, loin du contenu « technique » des modèles, d'identifier dans le champ des questionnements prospectifs les points que les outils semblent bien couvrir mais surtout les points que, pour différentes raisons, **face aux principales questions identifiées soulevées par la transition bâtiment / immobilier, les modèles actuels semblent mal aborder, voire pas du tout**, ne permettant donc pas d'informer suffisamment la prospective. Par exemple, l'enjeu d'une maîtrise de la distribution des situations d'habitat autour d'une moyenne implique de disposer d'une stratification fine et combinée des logements et des caractères socio-économiques des occupants.

Ainsi, **l'intention** de la cartographie est de :

- réfléchir aux différents **enjeux** associés à une trajectoire cohérente de transition (résilience aux évolutions climatiques, performance de la rénovation, évolution démographique, traitement des inégalités, répartition de la valeur...);
- identifier les principales **questions** posées pour la prospective de la transition bâtiment / immobilier que l'appareillage de modélisation actuel semble peu ou mal traiter ;
- fournir ainsi la base pour pointer les besoins d'évolution concernant les paramètres couverts et les fonctionnalités descriptives et dynamiques assurées par les modèles.

Sur cette base, **le concept** développé pour cette cartographie dans la suite de l'étude consiste à :

- s'appuyer sur les facteurs prospectifs clés pour balayer l'ensemble des enjeux ;
- regrouper par catégories et qualifier les questions et enjeux ressortant comme mal traités pour en vérifier la complétude et discuter la priorisation.

Cartographie « Outils et modèles »



À l'opposé de cette dimension exploratoire, la cartographie des modèles et des outils mobilisés aujourd'hui pour traiter la question de la transition du bâtiment et de l'immobilier s'inscrit dans la nécessité de dresser, pour le connaître et le partager, un état des lieux de l'appareillage de modélisation tel qu'il existe. La question qui guide cette cartographie est d'interroger **la manière dont les modèles fonctionnent concrètement**, en caractérisant leur périmètre, leurs méthodes de calcul, leur philosophie, ou encore la nature de leurs résultats. Par exemple, cette approche peut permettre de compter et de rapprocher les modèles qui traitent du bâtiment sous l'angle de l'énergie, qui procèdent d'une agrégation « bottom-up » du parc, qui couvrent le résidentiel ou le tertiaire, qui travaillent en optimisation ou dans une visée normative, etc.

Dès lors, **l'intention** de cette cartographie est de :

- dresser un état des lieux des modèles et outils repérés autour de la manière dont ils modélisent, sous un angle ou sous un autre, l'évolution du secteur du bâtiment et de l'immobilier.
- repérer ainsi le niveau de diversité en termes de périmètre, de fonctionnalités descriptives et dynamiques mises en œuvre par les modèles, et des impacts de différente nature qu'ils traitent.
- identifier, pour les mettre ensuite en perspective à la lumière des enjeux prospectifs, les convergences voire les redondances et par différence, les lacunes ou les faiblesses.

Dans cet esprit, **le concept** retenu pour élaborer cette cartographie vise à :

- mettre à plat les différentes caractéristiques des modèles, en distinguant :
 - le périmètre de description du parc de bâtiments, du point de vue de la typologie comme de l'implantation,
 - le périmètre de calcul, inclus la logique sous-jacente au calcul, le mode d'agrégation / désagrégation, et les interactions ou rétroactions prises en compte,

- le périmètre des impacts environnementaux, économiques et sociaux pris en compte dans ou résultant du calcul ;
- situer chaque modèle ou outil sur cette grille de caractéristiques, et compter les modèles par caractéristique.

Cartographie « Champs et paramètres »



Même s'ils traitent tous d'une manière ou d'une autre de l'évolution du stock de bâtiments, les outils l'abordent sous des angles très différents, en intégrant ou non les différentes dimensions associées – telles que l'occupation des sols, la consommation de ressources, la population qui les occupe ou les aspects économiques –, et en mobilisant différents objets pour les décrire et les mettre en relation. La question qui guide cette cartographie est ainsi d'identifier les éléments constitutifs des modèles, la manière dont ils décrivent la réalité qu'ils visent à documenter, les éléments et les paramètres qu'ils utilisent et les relations qu'ils établissent entre eux. Par exemple, il s'agit d'interroger la manière dont est assuré ou non dans la palette de modélisation le lien entre la description des bâtiments du point de vue de leur surface occupée, qui intéresse par exemple la dimension énergie, et leur forme et leur densité qui intéresse la dimension sol.

L'intention de cette cartographie consiste donc à :

- identifier et séparer les différentes dimensions, ou **champs** dans lesquels se joue la modélisation des trajectoires de transition pour l'immobilier et le bâtiment : leur territorialisation et leur empreinte au sol, le parc de bâtiments lui-même, les équipements consommateurs d'énergie dont ce parc est doté, les ressources que le parc et ces équipements consomment et ce qu'ils rejettent, la population qui les occupe et les paramètres économiques relatifs à cette activité ;
- repérer ainsi les **paramètres et les unités fonctionnelles** clés pour caractériser les trajectoires dans chacune de ces dimensions et les relier entre elles ;
- mesurer la manière dont les outils et modèles existants appréhendent ces différentes dimensions, tant du point de vue des choix d'unités fonctionnelles que de l'intensité avec laquelle elles sont utilisées.

Le concept qui guide la conception de cette cartographie est donc le suivant :

- lister et décrire les dimensions mises en jeu, en identifiant pour chacune d'elle les principales caractéristiques d'intérêt et les principaux facteurs d'évolution de ces grands paramètres ;
- identifier dans les outils et modèles les principales unités fonctionnelles utilisées et les indicateurs / grandeurs retenus pour en caractériser l'évolution.

Cartographie « Chaînages et bouclages »



Un certain nombre d'outils ou modèles semblent fonctionner de façon relativement isolée, sans lien fonctionnel avec d'autres outils s'inscrivant dans l'écosystème étudié ; d'autres sont reliés entre eux, parfois de façon assez complexe comme dans le cas par exemple de la suite de modèles mobilisée par l'ADEME pour l'élaboration de ses scénarios *Transitions(s) 2050*. La question qui guide cette cartographie est donc de repérer les liens entre les outils et modèles existants et de caractériser la nature de ces liens, en s'interrogeant sur leur fonctionnement en écosystème.

Cette cartographie porte donc **l'intention** suivante :

- repérer la manière dont les outils étudiés se combinent, s'emboîtent, ou se superposent en l'état actuel pour identifier les manques et les articulations à développer
- caractériser, au-delà des modèles conçus comme des objets indépendants, les enchaînements plus ou moins complexes qui sont mis en place ou peuvent être envisagés entre eux, en distinguant deux modalités :
 - le **chaînage**, dans lequel les sorties d'un modèle sont les entrées d'un suivant, selon un processus linéaire. C'est par exemple le cas où les sorties d'un modèle de projection du volume de construction neuve permettent de nourrir le modèle sur l'impact sur l'artificialisation des sols ;
 - le **bouclage**, dans lequel les entrées et les sorties de deux modèles se répondent, selon un processus itératif. C'est par exemple le cas où les sorties d'un modèle de projection d'un rythme de rénovation

permettent dans un second modèle de calculer les emplois nécessaires, et où ce résultat permet d'ajuster le rythme de rénovation dans le premier modèle.

Le concept de cette cartographie est donc de représenter, lorsque c'est possible, les relations entre les outils, et la matière dont les chaînages et bouclages mis en jeu permettent in fine de relier différentes données d'entrée à différents résultats en sortie.

2.3.3. Ateliers

Il était dès l'origine prévu, pour s'assurer de la bonne couverture du champ considéré, consolider les résultats de l'analyse et partager la démarche, d'intégrer dans la méthodologie des temps collectifs de réaction et d'échange. C'est dans cet esprit que deux ateliers en visioconférence ont été organisés les 4 et 12 octobre 2023, à une étape où 35 outils et modèles environ avaient déjà fait l'objet d'une collecte d'information et d'une analyse. Au total, une quarantaine de personnes, représentant une vingtaine d'organisations porteuses ou utilisatrices directes des modèles ont participé, se répartissant environ à part égale entre les deux sessions.

Globalement, l'objectif de ces deux ateliers était double :

- partager les résultats provisoires de l'étude avec la communauté de modélisateurs et les enrichir ;
- réfléchir ensemble aux perspectives qu'elle ouvre pour la modélisation faite par chacun et pour la capacité collective à représenter et informer la transition.

Après un rappel des objectifs de l'étude, présentés comme une contribution à la construction d'une prospective cohérente et robuste de la transition écologique du bâtiment et de l'immobilier, et une introduction aux objectifs des ateliers, chacun d'eux a permis d'alterner des temps de présentation et de collecte de réactions sur les travaux d'analyse, et des temps plus ouverts d'échange. Pour éviter la redondance, deux des quatre cartographies ont été traitées dans chaque session, dans un ordre destiné à en favoriser l'appropriation.

Le **premier atelier** était intitulé «Comment les modèles permettent de croiser les phénomènes techniques, économiques et sociaux associés à la transition du bâtiment et de l'immobilier ?». Il a permis de présenter d'abord la cartographie «outils et modèles», jugée la plus directement abordable car à la fois la plus proche d'une logique d'état des lieux et d'une caractérisation des outils dont les participants pouvaient être familiers. Elle a ensuite porté, à l'opposé dans la lecture à deux axes, sur la cartographie «questions et enjeux», apportant par contraste une ouverture sur la projection des sujets à considérer pour renforcer les démarches prospectives.

Après la première présentation, et quelques constats préliminaires sur le degré plutôt important de diversité mais relativement faible de diversité des modèles, et sur quelques traits relatifs notamment à leur périmètre de description, aux mécaniques de modélisation observées et aux impacts couverts, un premier tour de réaction a été enregistré en petits groupes, autour de deux questions : il s'agissait d'abord de vérifier si cette cartographie faisait sens pour les participants en leur demandant s'ils y positionnaient facilement leur(s) propre(s) outil(s), puis de mesurer leur réception de ces premiers messages en leur demandant ce qui les surprenait le plus dans l'analyse présentée.

De la même manière, la présentation de la philosophie, de l'intention et des premiers résultats de la seconde cartographie traitée a permis de partager quelques constats sur la grande richesse de l'appareillage de modélisation de l'évolution du bâtiment et de l'immobilier et sur la qualité de l'éclairage qu'il apporte à la prospective, mais aussi sur d'importants manques ou faiblesses vis-à-vis de la construction de trajectoires plus cohérentes, ou plus robustes par rapport à certains enjeux. Comme pour la précédente, un tour de réaction en petits groupes a permis de sonder les participants sur la pertinence des catégories présentées, sur le degré de couverture des points listés, sur l'identification éventuelle d'autres enjeux et sur les points d'attention prioritaires.

L'atelier s'est poursuivi autour de deux temps d'échange plus ouverts. Le premier a consisté, une nouvelle fois en sous-groupes, à se projeter sur des enjeux d'évolution des moyens de modélisation en s'interrogeant sur les changements souhaitables en matière de modélisation des trajectoires du bâtiment et de l'immobilier, en général ou dans les démarches menées par chacun des participants, à l'horizon de 5 ans. Le deuxième, plus ouvert encore et tous participants rassemblés, a permis de s'interroger sur les modalités possibles d'une communauté de prospective bâtiment et immobilier, sur les avantages qui pourraient en être attendus et sur les freins potentiels à sa mise en place.

Le **second atelier**, construit sur le même principe, était titré « Comment les modèles permettent d'anticiper et d'optimiser les stratégies de transition du bâtiment et de l'immobilier ? ». Il a permis de présenter les deux cartographies restantes : d'abord celle sur les « champs et paramètres », pour une entrée en matière concrète sur la grande diversité des objets manipulés par les modèles considérés, puis l'analyse des « chaînages et bouclages », afin d'inciter les participants à se projeter dans une possible meilleure intégration des différents outils existants.

Comme dans le premier atelier, la première présentation a permis de partager des premiers constats, portant sur les dimensions prioritairement couvertes ou au contraire très peu traitées, sur la grande diversité des unités fonctionnelles potentiellement mobilisées et sur le nombre relativement limité de celles qui concentrent l'attention, etc. Un tour de réaction du même type que lors de l'atelier précédent a permis de récolter les réactions de confirmation ou d'étonnement.

La présentation de la dernière cartographie, centrée sur les constats opérationnels tirés de l'expérience de gestion de sa suite de modélisation par l'ADEME, a permis de mettre en évidence la richesse tirée de l'articulation entre différents outils et les obstacles qu'elle rencontre, puis de faire réagir les participants sur le potentiel ou les manques qu'ils identifient pour leurs travaux en matière de chaînage voire de couplage d'outils.

Cet atelier s'est également conclu par deux temps plus ouverts. Le premier, prolongeant la réflexion initiée par le tour de réaction précédent, a permis de poser la question de la limite vers laquelle il semble utile et possible de tendre en termes d'articulation des modèles, avec toutes les questions que cela peut soulever. Le dernier temps a porté sur la même question que lors du premier atelier.

2.3.4. Réalisation des fiches « outils »

Pour alimenter le travail de cartographie et documenter l'analyse menée sur chaque modèle étudié, des fiches descriptives des outils de modélisation ont été réalisées. Ces fiches, rassemblées en annexe, ont pour la plupart été produites essentiellement en deux temps :

- d'abord une prise d'information, soit directement lorsque la connaissance initiale par les auteurs ou les pilotes de l'étude le permettait, soit lors de l'entretien avec les porteurs des outils concernés (complété le cas échéant lors du processus de relecture ou par des questions complémentaires), soit via la documentation académique disponible, lorsque la manque de temps ou de disponibilité n'a pas permis un échange avec les porteurs ;
- puis, une fois le principe des cartographies établi et leur structure stabilisée, une « fiche d'identité » plus standardisée pour repérer le positionnement du modèle dans la cartographie, ou plutôt dans chacune des dimensions de la cartographie.

Dans l'ensemble, la structuration et la constitution des fiches a progressivement permis de préciser la démarche cartographique et de développer l'analyse sur cette base, ce qui a en retour permis d'affiner la structure des fiches, d'harmoniser partiellement leur format, et d'affiner leur contenu. Dans ce processus, un équilibre a été cherché entre la volonté de standardiser le format des fiches et celle de respecter la très grande diversité des modèles et de leur analyse.

Cette standardisation du format de restitution de la collecte d'information et de l'analyse de chaque outil, modèle ou démarche est en effet apparue nécessaire pour mieux documenter et partager le contenu de l'étude. Elle n'a toutefois pas cherché à gommer la très grande hétérogénéité du contenu, apparue dans le processus à trois niveaux :

- il y a d'abord une hétérogénéité naturelle des outils et modèles étudiés eux-mêmes, que ce soit dans la profondeur d'information nécessaire à leur compréhension, par exemple entre des outils de simulation très spécifiques et volontairement simples et des modèles généraux beaucoup plus complexes, ou sur des éléments fondamentaux, comme leur périmètre d'application, leur mode de fonctionnement, leur portage, dont la diversité est difficile à faire entrer dans un format unique ;
- ensuite, le travail de collecte de l'information, par voie d'échanges ou de lecture, n'a pour différentes raisons d'intérêt ou pratiques pas été mené avec la même profondeur pour tous les outils et modèles, d'autant plus que l'approfondissement de certains points dans l'analyse d'un modèle donné pouvait faciliter la compréhension de points similaires dans d'autres modèles et réduire le besoin d'aller dans leur détail ;

- l'hétérogénéité est enfin intervenue dans la restitution écrite de ce travail de collecte et d'analyse, qui là encore pour des raisons d'intérêt ou pratiques n'est pas entrée dans le même niveau de détail pour toutes les fiches.

Au final, chaque fiche rassemble en tous cas, avec plus ou moins de détail et d'hétérogénéité dans la répartition de l'information entre les différentes rubriques, les informations suivantes :

- quelques **données de référence** sur l'outil, le modèle ou la démarche, avec son nom, des contacts et le cas échéant des ressources documentaires ;
- des éléments de **caractérisation générale**, relatifs à la finalité et à l'usage de l'outil, au type de modèle et à son architecture, à son champ de modélisation et à son périmètre technique, géographique et temporel ;
- des constats et réflexions relatifs au **détail du modèle** (déclinés le cas échéant par module), comprenant à la fois des éléments descriptifs sur son périmètre détaillé, ses principes de calcul, ses entrées et ses sorties, et des éléments plus réflexifs sur ses points forts, ses éventuelles lacunes et pistes de développement, etc. ;
- enfin, des constats tirés par les auteurs de l'étude, à la lumière des informations précédentes, sur le **positionnement dans les cartographies** du modèle considéré.

Il est important de souligner ici que ce travail d'analyse des outils, même s'il a conduit à mettre en évidence leurs points forts mais aussi leurs limites, n'a pour but ni d'évaluer leur performance, ni de juger de leur qualité par rapport à la problématique de l'étude. Au contraire, chacun des porteurs de modèle rencontré est conscient, comme les auteurs de l'étude, du fait que tout travail de modélisation présente des limites intrinsèques, dans sa capacité à capter la complexité de la réalité qu'il cherche à représenter sur son périmètre d'application, et plus encore dans la limitation même, inévitable, de ce périmètre. Dans cet esprit, l'objet de l'étude est strictement de comprendre l'intention et le fonctionnement de chacun des outils considérés pour mieux caractériser sa contribution actuelle à l'écosystème de modélisation et son positionnement dans la multi-cartographie du champ, sans notion de bon ou de mauvais positionnement.

Pour respecter cet objectif et réduire le risque de mauvaise compréhension ou de mauvaise interprétation des modèles, la très grande majorité des fiches a été relue par les porteurs de modèles concernés. Par ailleurs, compte tenu du délai écoulé entre la prise d'information sur certains outils et la publication, elles reflètent pour certaines d'entre elles les évolutions apportées aux modèles pendant l'année 2024.

3. Trame des cartographies

Pour mener à bien l'analyse du champ constitué par ce que l'étude définit comme l'écosystème de modélisation pour la prospective de la transition écologique du secteur du bâtiment et de l'immobilier, il a rapidement semblé naturel de l'approcher par une démarche de cartographie, qui est progressivement devenue, face au foisonnement du sujet, une démarche de multi-cartographie. Celle-ci s'est appuyée sur quatre cartographies, dont le découpage et la structure se sont précisées au fil de l'étude, et de leur alimentation par l'analyse des outils et modèles.

Bien que ce processus ait en pratique fait l'objet d'une progression beaucoup plus continue, on peut distinguer a posteriori deux étapes. La première, décrite dans la présente section, concerne la conception et la construction de la trame de chacune de ces quatre cartographies, avant leur alimentation par les données quantitatives issues de l'analyse des outils et modèles, cette analyse des modèles puis des cartographies étant proposée dans les deux sections suivantes.

Comme indiqué dans l'intention méthodologique dans la section précédente, les quatre cartographies dont la construction est présentée ici doivent être vues comme des approches complémentaires, ne prenant pleinement sens qu'ensemble et sans ordre prédéterminé. Elles sont ici présentées dans un ordre qui correspond à la logique d'exposition suivante : on s'intéresse d'abord à la structuration des questionnements prospectifs auxquels l'écosystème semble aujourd'hui peiner à répondre (Questions et enjeux) avant de considérer celle des multiples dimensions et objets sur lesquels les modèles interviennent pour cela (Champs et paramètres), puis celle des différentes approches de calcul qu'ils déploient pour projeter l'évolution de ces objets (Outils et modèles), et pour finir celle des articulations qui s'établissent ou non entre eux pour renforcer ces calculs (Chaînages et couplages).

3.1. Cartographie « Questions et enjeux »

La première des cartographies concerne les attendus de la démarche prospective, c'est-à-dire la capacité des modèles à répondre aux différentes questions qui se posent du point de vue de la cohérence et de la pertinence des scénarios. Cette perspective offre d'une certaine manière le pendant, du point de vue de la sortie des modèles, de ce que représente la liste des 22 facteurs prospectifs du point de vue de l'entrée dans les modèles.

3.1.1. Construction

Là où les facteurs prospectifs établissent une liste des incertitudes à prendre en compte dans la construction des réponses qu'apportent les modèles, les questions prospectives envisagées ici cherchent plutôt à compléter la liste des questionnements que ces réponses devraient permettre de traiter. L'analyse des scénarios existants et le recensement de différentes questions prospectives se posant à leur lecture permet ainsi d'identifier un certain nombre de questionnements prospectifs peu ou mal abordés aujourd'hui, que l'analyse des modèles vient compléter en pointant, en plein lorsqu'ils traitent explicitement un enjeu spécifique comme en creux lorsqu'on constate un point aveugle.

D'une manière générale, les travaux prospectifs disponibles semblent balayer, en s'appuyant sur la diversité des outils de modélisation, un panorama assez large de questions prospectives. Pourtant, les échanges entre producteurs et utilisateurs de scénarios se rapportant à la transition énergétique en général ou à son application au secteur du bâtiment, et plus généralement les débats autour de ces questions font régulièrement apparaître de nouveaux questionnements. À titre d'exemple, on peut mentionner l'émergence progressive dans la période récente de sujets qui, sans être nécessairement nouveaux, se font de plus en plus pressants, comme la nécessité de prendre en compte les enjeux d'adaptation au changement climatique, les réflexions sur la robustesse ou la résilience des trajectoires dans un monde semblant de plus en plus exposé aux crises, la préoccupation pour la maîtrise de l'artificialisation des sols, ou encore la réflexion sur l'évolution des modes de vie, entre support croissant des technologies ou progression de la sobriété.

La première étape de cette cartographie consiste donc à recenser et structurer les divers questionnements de ce type, tels qu'ils ont pu être repérés au fil de l'analyse des travaux existants et des modèles. La synthèse de cette collecte, qui a commencé à se structurer dès la première phase de l'étude pour alimenter la réflexion avant d'être précisée par la suite, est présentée à la figure 6. Comme celle-ci

l'indique, ces questions et enjeux nous semblent pouvoir être regroupés, dans leur diversité, en trois grandes catégories :

- les problématiques de **complétude technique**, au sens de la capacité des modèles à couvrir de façon aussi exhaustive que possible les enjeux techniques associés aux bâtiments et à l'empreinte de leur construction et de leur occupation, en tenant compte de leur évolution ;
- les enjeux associés aux dynamiques de transformation qui peuvent intervenir dans l'évolution du secteur du bâtiment et de l'immobilier, en distinguant les **dynamiques socio-économiques**, les **dynamiques sociétales** et les **dynamiques territoriales** ;
- les questionnements associés à la **réponse aux crises**, dans toute leur diversité, qu'il s'agisse de crises consécutives à des phénomènes endogènes au secteur (effets de contraction ou d'expansion trop rapide, de tension entre l'offre et la demande, de goulot d'étranglement...) ou à des chocs externes, qu'il s'agisse de crises du système économique ou sociétal ou de troubles géopolitiques.



Figure 6 – Base de la cartographie « Questions et enjeux »

3.1.2. Détail des questionnements

Dans le détail, les thématiques identifiées comme émergentes, nouvelles ou peu éclairées, regroupées sous ces cinq grandes catégories, peuvent être précisées et illustrées comme suit.

A – Complétude technique

D'une manière générale, le champ des modèles analysés, et leur évolution ces dernières années témoigne d'un élargissement progressif des dimensions techniques que les uns et les autres captent. Ils couvrent différents types de bâtiments, et traitent une palette de plus en plus large d'impacts et d'effets systémiques. Pour autant, plusieurs sujets semblent moins bien traités. Ils peuvent être regroupés en quatre thèmes.

A1. Analyse cycle de vie :

Le premier porte sur la prise en compte de l'analyse en cycle de vie des bâtiments dans les stratégies de transition. Il s'agit notamment d'assurer une bonne **maîtrise des besoins**, en développant une vision cohérente des besoins en ressources et des impacts du parc, entre les phases de construction, usage et démolition. Il s'agit également d'éclairer l'**arbitrage des conflits d'usage** autour notamment des besoins en matériaux, et de la concurrence ou de la cohérence avec d'autres usages, par exemple sur l'affectation des ressources issues de la biomasse.

A2. Empreinte écologique :

Des questions se posent également du point de vue de l'empreinte globale des bâtiments. Parmi celles-ci, les plus importantes peuvent concerner la maîtrise du bilan **export/import des émissions de gaz à effet de serre** associées à l'évolution des bâtiments, au-delà des émissions domestiques, la maîtrise de l'**usage des sols**, ou encore celles des **impacts sur la biodiversité**.

A3. Complétude du parc bâti :

Ce thème regroupe deux sujets relativement différents. Le premier concerne la couverture plus complète du parc existant, au sens où l'essentiel des efforts de modélisation se concentre sur le parc résidentiel et/ou tertiaire, laissant pratiquement hors champ l'ensemble des **bâtiments de l'industrie et de l'agriculture**, dont le devenir devrait pourtant entrer dans les visions prospectives. Le second porte, dans une prospective plus ouverte, sur la réflexion en matière d'**innovation**, et des possibilités de voir apparaître des **bâtiments nouveaux** très différents par conception dans leur forme, leur construction ou leurs usages, en intégrant par exemple beaucoup plus de modularité.

A4. Bâti dans son environnement :

D'une manière générale, les bâtiments ne sont pas isolés de leur environnement, et la question des formes urbaines notamment se pose dans les visions prospectives. En termes d'enjeux pour la modélisation, on peut d'abord identifier un sujet d'**optimisation locale**, qui peut par exemple aussi bien porter sur la gestion des ombrages via la disposition respective de bâtiments que sur des logiques de partage de production photovoltaïque intégrée à l'échelle d'un quartier, dont la prise en compte à une plus grande échelle est nécessaire mais difficile. Une autre question posée est celle de l'interaction entre l'évolution des bâtiments et celle des **infrastructures** nécessaires à leur bonne occupation, qu'il s'agisse des réseaux d'énergie, d'eau ou de communication comme des réseaux de transport.

B – Dynamiques socio-économiques

La projection de trajectoires de transformation du parc de bâtiments ne peut s'envisager sans prendre en compte la dimension socio-économique associée, tant du point de vue de la capacité à la mettre en œuvre, en termes de financement et de ressources, que de son impact sur la valeur des biens ou sur les inégalités. Si ces aspects économiques, souvent quantifiables au même titre que les aspects techniques, sont traités par de nombreux modèles, des questions importantes n'en restent pas moins posées.

B1. Prix, conditions financières :

Les premières portent globalement sur les questions de prix et de financement, à commencer par la caractérisation des **mécanismes de prix**(des actions de construction et de rénovation, de l'immobilier...), et de leur interaction avec les trajectoires de transition. Plus concrètement, la question de l'évolution de la **capacité financière** des agents économiques, en particulier des ménages, à couvrir le financement d'achat ou de rénovation des biens se pose. Enfin, du point de vue de l'immobilier, un point crucial concerne l'évolution de la valeur du patrimoine, c'est-à-dire la projection de l'interaction entre trajectoires de transition et **valeur des stocks**, avec par exemple le risque de déclassement de bâtiments sous l'effet de changements de pratiques(tertiaire et télétravail...) ou de contexte(mauvaise adaptation au changement climatique...).

B2. Emplois, compétences :

La problématique des emplois et des compétences intervient, dans son interaction avec les visions prospectives de la transition énergétique du bâtiment et de l'immobilier, à deux niveaux. La première concerne l'**évolution des métiers** en général, et ce qu'elle peut changer ou non dans notre rapport aux bâtiments. La seconde est celle de l'impact direct de la transition sur les métiers du bâtiment et de l'immobilier, qui se traduit notamment par une interrogation sur la cohérence de cet impact avec les besoins pour la gestion et la transformation du parc, donc sur la **disponibilité des compétences**.

B3. Revenus, ressources :

Les questions qui se posent dans ce domaine portent notamment, de manière naturelle, sur l'interaction entre les trajectoires envisagées du point de la vue de la transition énergétique et le poids de l'énergie, des

équipements et de la location ou de la propriété immobilière dans le **budget des ménages**. En lien avec ce point, une question récurrente concerne plus spécifiquement l'existence ou non d'effets dits « rebond », potentiellement susceptibles de contrarier certaines trajectoires envisagées.

B4. Distribution sociale :

Au-delà des questions posées à un niveau plus macroéconomique, des enjeux importants résident dans la capacité à projeter les effets des trajectoires de transition énergétique du bâtiment et de l'immobilier autrement qu'en moyenne pour la population, ou pour les ménages. Il s'agit notamment, en premier lieu, d'éclairer l'enjeu de la réduction de la **précarité énergétique**, et d'informer l'impact des trajectoires sur les **inégalités**. Certaines préoccupations pointent même, en allant plus loin, la nécessité d'être capable de préciser, au sein d'une évolution par catégories, les impacts en termes de **parcours de vie** : il s'agit par exemple d'éclairer la manière dont un ménage pourra ou non, au cours de sa vie, accéder à différents types de logements ou y demeurer, en fonction non seulement de ses revenus mais de contraintes issues de la trajectoire de transition.

C – Dynamiques sociétales

Les évolutions sociétales, bien que plus difficilement appréhendables par le biais de la quantification, et donc de la modélisation, que les questions techniques et les évolutions économiques – hormis les aspects démographiques –, sont également au cœur des réflexions sur la prospective de la transition du bâtiment et de l'immobilier. Dans ce registre, de nombreux questionnements émergent sans être véritablement abordés, si ce n'est à la marge.

C1. Evolution des modes de vie :

Le premier domaine important dans ce registre concerne l'évolution des modes de vie, qu'il est difficile de ne pas interroger dans une prospective de la transition énergétique portant en général un horizon de quelques dizaines d'années. Il s'agit d'abord de prendre en compte l'évolution possible vers davantage de **sobriété**, ainsi que le retour à davantage d'**économie locale**, pour en évaluer pleinement le potentiel et les impacts. La question peut parallèlement se poser de l'évolution vers de **nouveaux usages**, parfois à rebours de la précédente comme l'explosion du numérique, et même plus largement, de l'évolution du **rappart au travail** ou du **rappart au temps** et de ses impacts sur l'occupation des bâtiments,. Enfin, dans un registre similaire, l'interaction des trajectoires avec l'évolution de l'**égalité femme/homme** doit être considérée.

C2. Evolution de la population :

Des questions assez structurantes se posent également vis-à-vis de la démographie, sous différents angles. Le premier est l'**évolution des besoins**, du point de vue qualitatif plutôt que quantitatif, dans le sens par exemple où pour un même volume de population, le vieillissement peut avoir un impact significatif sur les besoins respectifs en parc résidentiel et tertiaire, et selon les secteurs du tertiaire. Le second porte sur les enjeux de **répartition** et de **densité** et leur impact sur les besoins en bâtiments, qu'il s'agisse d'évolution de la répartition de la population entre régions, en lien par exemple avec le changement climatique, ou de changements dans la répartition entre zones urbaines, périurbaines et rurales. Par ailleurs, les modèles qui intègrent des hypothèses sur l'évolution de la population en volume tablent souvent sur une projection centrale, sans étude de **sensibilité aux différentes projections** démographiques possibles.

C3. Changement environnemental :

Du point de vue des changements sociaux, un sujet devenant majeur face aux atteintes à l'environnement est celui de l'adaptation. La question prospective centrale qui est posée ici est celle de l'articulation entre des stratégies de transformation du parc de bâtiments motivées notamment par la nécessité de réduire certains impacts environnementaux, à commencer par le **changement climatique**, et des stratégies d'adaptation à ces impacts. Il s'agit bien sûr en premier lieu de l'adaptation aux impacts du changement climatique, mais aussi potentiellement à d'autres impacts liés au dépassement des limites planétaires, à commencer, même si son rapport avec le bâtiment est moins direct, par l'effondrement de la biodiversité ; on peut également songer, par exemple, à l'adaptation à des conditions de situation pandémique.

D – Dynamiques territoriales

Parallèlement aux dynamiques socio-économiques et sociétales évoquées précédemment, il faut également considérer les dynamiques territoriales. De nombreux outils et modèles s'attachent explicitement à une application territoriale, à différentes échelles. Pourtant, dans ce domaine aussi, de nombreux enjeux peuvent être identifiés.

D1. Evolution différenciée :

La question se pose d'abord d'une évolution différenciée entre les territoires, qui peut venir de dynamiques **socio-économiques** contrastées et qui doit s'envisager à la fois du point de vue de chacun des territoires

concernés et du point de vue de l'équilibre national. Elle peut également venir d'une **différenciation climatique**, qui peut non seulement s'exprimer par des évolutions dans la répartition de la population, mais aussi par des besoins différents du point de vue des bâtiments, tant en termes d'usages que d'adaptation.

D2. Articulation des échelles :

Sur les enjeux de territoire, l'articulation des trajectoires de transformation entre les différentes échelles est évidemment un sujet. S'agissant d'une problématique posée ici au niveau national, cette question se pose au niveau infra- aussi bien que supra-national. Sur le premier point, l'enjeu est celui de la **cohérence entre local et national**, c'est-à-dire des différentes évolutions projetées et de la cohérence des choix à toutes les échelles, du communal au national. Sur le second, l'enjeu principal est celui de l'**intégration européenne**, c'est-à-dire de la cohérence des visions développées à l'échelle française avec des enjeux de convergence, de solidarité, d'évolution de normes ou de politique industrielle posés à l'échelle européenne.

D3. Territoires spécifiques :

Enfin, la question se pose de la capacité de l'écosystème de modélisation de la transition du bâtiment et de l'immobilier à traiter dans le cadre national les territoires que constitue la Corse d'une part, et l'ensemble des territoires d'outre-mer, dans leur diversité d'autre part. La première est souvent incluse par défaut dans des trajectoires à l'échelle de la France métropolitaine, sans faire l'objet d'un traitement en propre ; les seconds sont souvent exclus de ces mêmes trajectoires, faute de savoir modéliser les enjeux qui leur sont propres à partir des outils nationaux.

E – Réponse aux crises

Le dernier domaine dans lequel des enjeux prospectifs importants sont identifiés est celui de la capacité du système, inclus le secteur du bâtiment et de l'immobilier, à répondre aux crises, et la capacité à intégrer cette nécessité de robustesse dans les trajectoires de transition – dans la mesure où les bâtiments doivent toujours, quelle que soit la situation de crise, rester en mesure d'abriter la population et ses occupations. Ce point semble d'autant plus important que la confrontation croissante à des crises de différente sorte, marquante ces dernières années, contraste avec la nature traditionnellement « continuiste » des modèles construits pour projeter la transition⁵.

E1. Chocs internes :

La première source de crise à considérer concerne le risque de chocs internes, causés par la mise en œuvre des stratégies de transition ou venant directement impacter celle-ci, notamment par le biais de rétroactions négatives. Ce sujet peut être lié, du côté de l'offre, à des situations de **tension**, voire de **rupture** sur les prix ou sur les **ressources** matérielles ou humaines nécessaires à la transition du secteur du bâtiment, mais il peut aussi venir du côté de la demande de **phénomènes disruptifs sur les usages**.

E2. Crise du système :

Dans le champ des crises, on peut également identifier les facteurs de crise plus globale du système, et s'interroger sur leur interaction avec les enjeux spécifiques de la trajectoire de transformation des bâtiments. Il peut s'agir, sans que cette liste soit limitative, de situations d'**effondrement économique** plus ou moins poussé, de **pandémie**, ou de **rupture institutionnelle**, avec des effets différents sur les conditions d'usage des bâtiments, sur leur valeur, sur la capacité à les gérer et les transformer, etc.

E3. Crise géopolitique :

Le dernier registre de crise à envisager est celui des crises géopolitiques. Même s'il peut conduire, dans ses formes extrêmes, à des situations dans lesquelles la question même de la transition énergétique du bâtiment n'est plus un enjeu prioritaire, la projection de l'impact de ces situations sur la mise en œuvre de la transition, et réciproquement de l'impact de la mise en œuvre de la transition sur la résilience à ces situations, peut être une préoccupation. On peut en particulier s'interroger sur la gestion sous cet angle d'un éventuel **choc migratoire**, mais aussi envisager des situations d'**embargo** ou de **blocus**, voire projeter pour aller au bout de la logique et dès lors qu'on ne peut totalement l'exclure, une situation de **conflit armé** sur le territoire.

L'ensemble de ces sujets est issu de la connaissance initiale par les auteurs des différents enjeux discutés autour des scénarios, de lectures menées dans le cadre de l'étude et des échanges conduits autour des modèles et de leur utilisation avec les différents porteurs de scénarios. Ils proposent un découpage de questionnements complexes qui mettent en jeu plusieurs des points identifiés ici, à

⁵Typiquement les porteurs de ces modèles, de plus en plus confrontés à cette question de la robustesse des trajectoires aux crises, la traite sous forme de « stress tests », comme l'a fait RTE dans le cadre de son exercice sur les *Futurs énergétiques 2050*, ou d'analyse ex-post de l'exposition des scénarios à différents risques endogènes et exogènes, comme l'a fait l'ADEME dans la mise à jour en 2024 de ses *Transitions(s) 2050*.

l'image par exemple de l'adaptation climatique, identifiée comme un enjeu en tant que tel parmi les dynamiques sociétales (**C3**), mais qui intervient aussi directement sous l'angle de l'évolution démographique (**C2**) ou des enjeux de différenciation territoriales (**D1**), voire si l'on élargit la perspective comme un facteur possible de choc migratoire (**E3**).

Les questionnements prospectifs ainsi listés et organisés ne sauraient être exhaustifs, ni même capter à coup sûr toutes les dimensions les plus importantes à prendre en compte. La présentation de ces catégories et leur illustration sur certains points clé n'a toutefois pas rencontré d'opposition en atelier. Au contraire, les participants ont globalement soutenu les préoccupations présentées, apportant quelques enrichissements reflétés dans la liste et dans la formulation des sujets ci-dessus, et se positionnant sur leur degré de priorité.

3.2. Cartographie « Champs et paramètres »

Du point de vue introduit par la cartographie précédente, en revenant à notre définition initiale, les modèles analysés dans cette étude sont des outils calculatoires permettant de construire, en prenant en compte différents facteurs prospectifs, des projections ou des trajectoires susceptibles de répondre à des questionnements prospectifs, qu'ils soient déjà bien identifiés et traités, comme les conditions d'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050, ou au contraire émergents ou peu couverts, comme les questions et enjeux listés ci-dessus. Ils procèdent pour cela à différents calculs, ce qui est l'objet de la cartographie suivante sur la typologie des « Outils et modèles », de manière isolée ou combinée avec d'autres, ce qui est l'objet de la typologie des « Chaînages et bouclages ». Mais avant cela, et pour réaliser ces calculs, les modèles opèrent une représentation sous des formes quantifiables des objets et des actions dont ils cherchent à projeter l'évolution.

La manière dont ils décrivent la réalité qu'ils visent à documenter influence directement le type de questions qu'ils peuvent traiter. Par exemple, selon l'objectif d'un modèle, celui-ci choisira de décrire un bâtiment d'une manière ou d'une autre : s'il est représenté par sa surface occupée, il sera possible de calculer la consommation d'énergie pour le chauffage ; s'il est représenté par sa forme et sa densité bâtie, il sera possible de calculer son impact sur l'occupation du sol ; s'il est représenté par ses modes constructifs (et les matériaux utilisés), il sera possible de calculer les besoins en ressources associés à la construction et à la rénovation – mais à l'inverse, traiter certaines de ces questions sans passer par une représentation adaptée sera plus compliqué.

C'est donc à cette question des « éléments constitutifs » (ou composants de base) sur lesquels reposent les modèles que s'intéresse cette deuxième cartographie. Son objectif est donc d'identifier les principales unités fonctionnelles (éléments d'entrée, de calcul intermédiaire ou de sortie) utilisées dans les outils et les modèles, ainsi que les leviers d'action qu'ils étudient (et la manière dont ils les expriment) et les indicateurs/quantités utilisés pour caractériser leur évolution.

Comme illustré par la figure 7, cette cartographie se structure autour de plusieurs dimensions, dans lesquelles les modèles manipulent des objets entre lesquels ils établissent, au sein d'une dimension ou d'une dimension à une autre, les relations qu'ils prennent en compte dans leur processus de calcul. Au fil de l'analyse des modèles, il est apparu que les unités fonctionnelles et les leviers traités par les modèles peuvent être rassemblés dans les six dimensions suivantes :

- la dimension principale est naturellement celle des **bâtiments** eux-mêmes, dans laquelle via des unités de bâtiments, nombre de logements, surfaces d'activité etc., ils peuvent être comptabilisés et répartis par type (résidentiel, avec les maisons individuelles et les logements collectifs, tertiaire, autres...), avec des caractéristiques relatives à leur année de construction, leur niveau de performance énergétique, etc. Les leviers d'action intervenant dans cette dimension sont typiquement les opérations de construction, rénovation et démolition ;
- les bâtiments sont physiquement reliés, par leur emprise, à la dimension des **sols**. Celle-ci permet de traiter, outre cette emprise, leur répartition spatiale ou leur localisation, avec des leviers tels que la densification ou l'artificialisation ;
- d'un point de vue toujours physique, une autre dimension concerne les **équipements** mobilisés pour répondre aux différents usages des bâtiments, tels que les systèmes de chauffage, d'éclairage, ou les différents matériels bureautiques ou l'électro-ménager. Ceux-ci peuvent être regroupés par type, par nombre, décrits par leur dimensionnement ou leur efficacité, et faire bien sûr l'objet d'acquisition, d'élimination ou de conversion ;

- une dernière dimension de description physique du système concerne les **ressources**, au sens des matières et des fluides consommés (et corrélativement rejetés) dans le cycle de vie des bâtiments eux-mêmes et des équipements, au sens de ces deux dimensions précédentes. Cette dimension est celle dans laquelle les outils manipulent des unités fonctionnelles liées à l'énergie et à sa consommation, aux matériaux mobilisés, à la consommation d'eau, ainsi qu'aux émissions de gaz à effet de serre, aux déchets et aux autres rejets, et des leviers tels que la substitution entre ressources ou la circularité ;
- à ces dimensions physiques, désincarnées, s'ajoute bien sûr une dimension démographique, dans laquelle les modèles prennent en compte la **population**, et la façon dont elle occupe, dans ses activités productives ou sociales, le parc de bâtiments. Celle-ci peut être considérée par exemple sous la forme d'individus, regroupés le cas échéant en ménages, d'actifs, de consommateurs ou d'usagers des services. Les leviers pris en compte dans cette dimension se rapportent notamment aux facteurs d'évolution démographique tels que la croissance de la population, son vieillissement ou les migrations ;
- enfin, une dernière dimension regroupe tout ce qui relève de l'**économie**, qui englobe l'ensemble des paramètres dont se saisissent les modèles pour représenter sous l'angle économique et financier l'évolution des dimensions précédentes. Les unités fonctionnelles mobilisées pour cela se rapportent typiquement aux coûts, aux investissements ou encore aux emplois, tandis que les leviers comportent l'ensemble des facteurs de régulation de l'économie, tels que les signaux prix ou les échanges.

Bien que la cartographie semble empiler ces dimensions dans un ordre logique, elles ne doivent pas être comprises comme des couches, dans le sens où il n'y a pas de superposition stricte et surtout pas d'ordre pré-déterminé entre elles, du point de vue du fonctionnement des outils. Un modèle peut au contraire entrer dans le champ par n'importe quelle dimension, et en attraper directement une autre, indépendamment de leur ordre : par exemple, le prix du foncier relie directement la dimension « économie » et la dimension « sols », alors que celles-ci apparaissent séparées par plusieurs dimensions dans la représentation choisie – mais réciproquement la cartographie permet de représenter le fait que les modèles établissent ou non cette relation entre les unités fonctionnelles qu'ils manipulent dans chacune de ces dimensions.

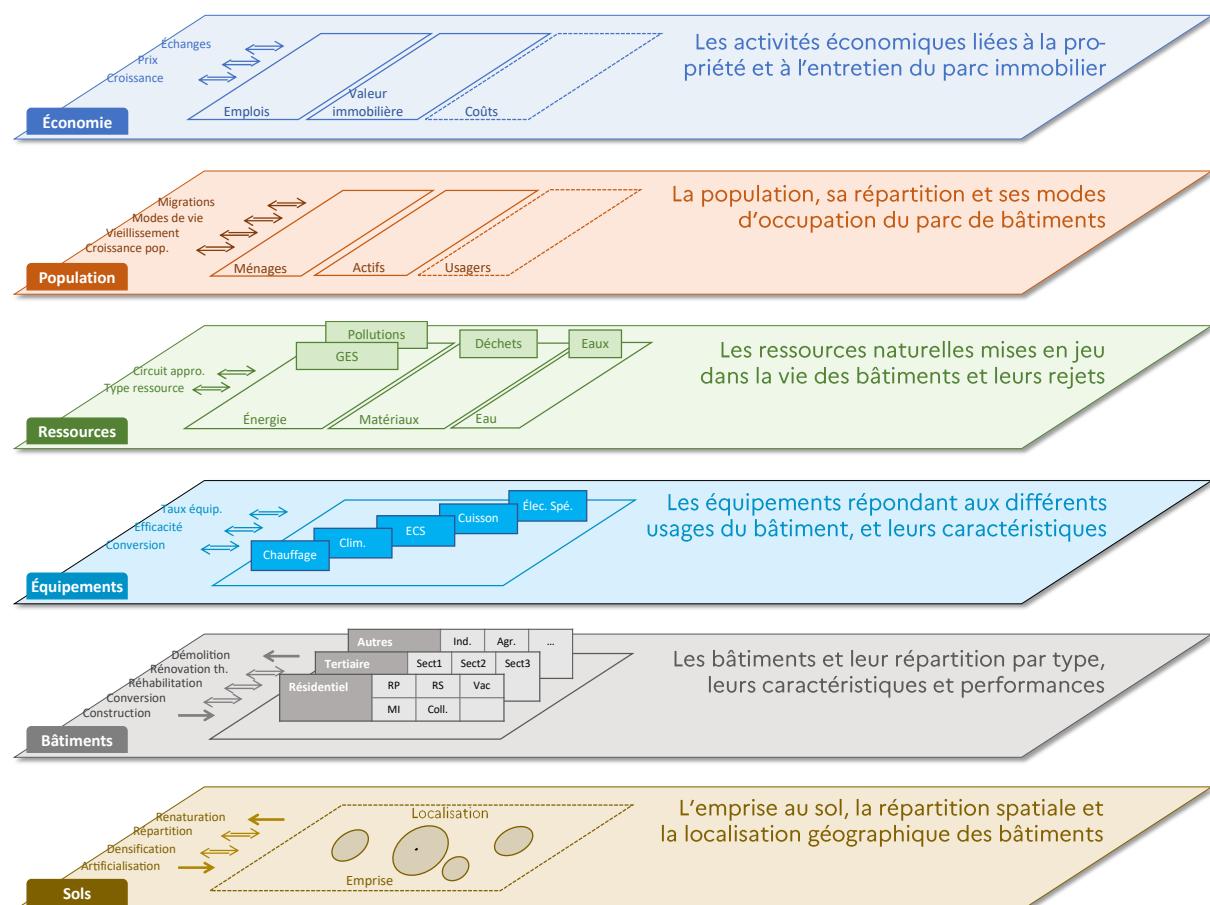


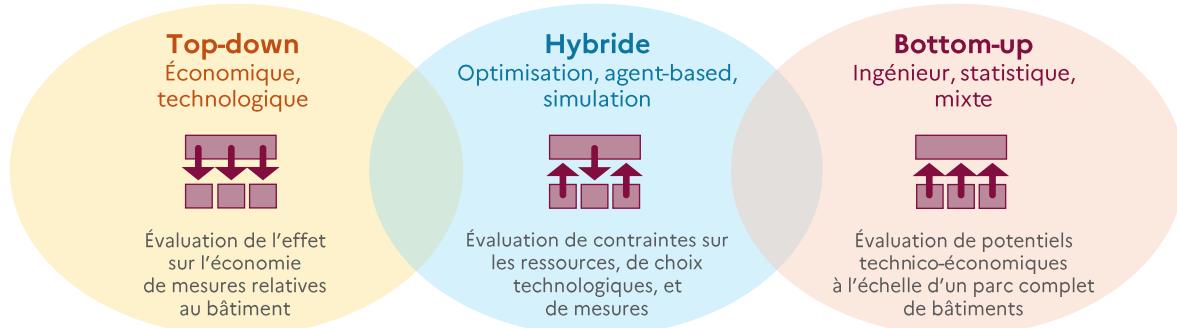
Figure 7 – Trame de la cartographie « Champs et paramètres »

3.3. Cartographie « Outils et modèles »

Dans la continuité de la logique de la cartographie précédente, qui s'attache à identifier quels objets les outils et modèles activent dans les différentes dimensions du champ pour établir les relations calculatoires par lesquelles ils vont chercher à projeter des évolutions du système, la question qui se pose ensuite est celle du type de calcul et de projection qu'ils cherchent ainsi à développer, et du périmètre technique, spatial ou temporel sur lequel ils opèrent. C'est l'objet de cette troisième cartographie, qui vise donc plutôt à établir une typologie du mode opératoire des outils et modèles considérés, en lien avec les questionnements de l'étude.

Il existe, comme on l'a déjà observé, une grande diversité de modèles, et diverses façons de les regrouper par catégories. Une première approche consiste classiquement à distinguer les modèles selon leur approche descendante ou ascendante (Mastrucci et al, 2023 – voir figure 8) :

- les **modèles « top-down »**, ou descendants représentent le secteur du bâtiment au niveau agrégé dans un cadre de modélisation soit économique, soit technologique. Ils sont principalement utilisés pour évaluer les réponses à des politiques relatives au bâtiment à l'échelle de l'économie tout entière et manquent de granularité pour distinguer par exemple différentes catégories de bâtiments ;
- les **modèles « bottom-up »**, ou montants représentent au contraire avec plus ou moins de détail le secteur du bâtiment ou certains de ses segments, agrégeant ensuite les résultats à l'échelle du système. Ils peuvent s'appuyer sur des modélisations de type ingénieur, ou statistique, ou sur des méthodes mixtes les combinant, et sont typiquement utilisés pour évaluer des potentiels technico-économiques l'échelle d'un parc ;
- les **modèles hybrides**, qui articulent comme leur nom l'indique les deux approches, et peuvent faire appel à des méthodes de simulation, d'optimisation, ou de modélisation des décisions d'acteurs (agent-based). Ils permettent à la fois d'explorer les conséquences de choix technologiques, les évolutions sous contrainte de ressources, ou les effets sur le secteur et au-delà de politiques du bâtiment.



*Figure 8 – Les traditions de modélisation du secteur des bâtiments
(Mastrucci et al, 2023 – traduction et adaptation par les auteurs))*

Parallèlement, les modèles peuvent donc faire appel à des modes de calcul différents, qui reflètent différentes logiques d'arbitrage des évolutions (The Shift Project, 2019). On distingue par exemple généralement les calculs relevant (1) de la simulation pas par pas de trajectoires, qui peut être ouverte, ou qualifiée d'exploratoire, reflétant les réponses à des hypothèses exogènes, ou au contraire fermés pour répondre à des objectifs normatifs, reflétant des contraintes endogénées, (2) de l'optimisation, généralement construite autour d'une fonction cible comme par exemple la minimisation des émissions de gaz à effet de serre cumulés sur la trajectoire et (3) de méthodes d'équilibre, qui reposent sur un calcul d'équilibre de marché où chaque acteur maximise ses utilités.

Enfin, les modèles peuvent être caractérisés par des éléments relatifs à leur degré de résolution temporel ou spacial (le pas de temps ou la maille géographique auxquels ils travaillent), à leur granulométrie (le degré de détail dans lequel ils vont, et donc d'hétérogénéité qu'ils peuvent représenter), ou encore à leur dynamique, qui peut par exemple reposer sur des hypothèses exogènes ou sur un calcul endogène (par exemple, le nombre de rénovations peut relever d'une hypothèse externe fournie en entrée au modèle, ou résulter d'un calcul sur la réaction des ménages à un signal fiscal). S'agissant dans l'étude d'outils s'appliquant au secteur du bâtiment, leur périmètre (plus large, ou au contraire plus étroit à l'intérieur de ce secteur) et le type de résultats qu'ils fournissent sont également des critères importants.

C'est sur cette base, et conjointement à la prise de connaissance des outils, qu'a été progressivement développée la cartographie « Outils et modèles », dont la trame, adaptée de ces différentes catégories, est présentée figure 9.

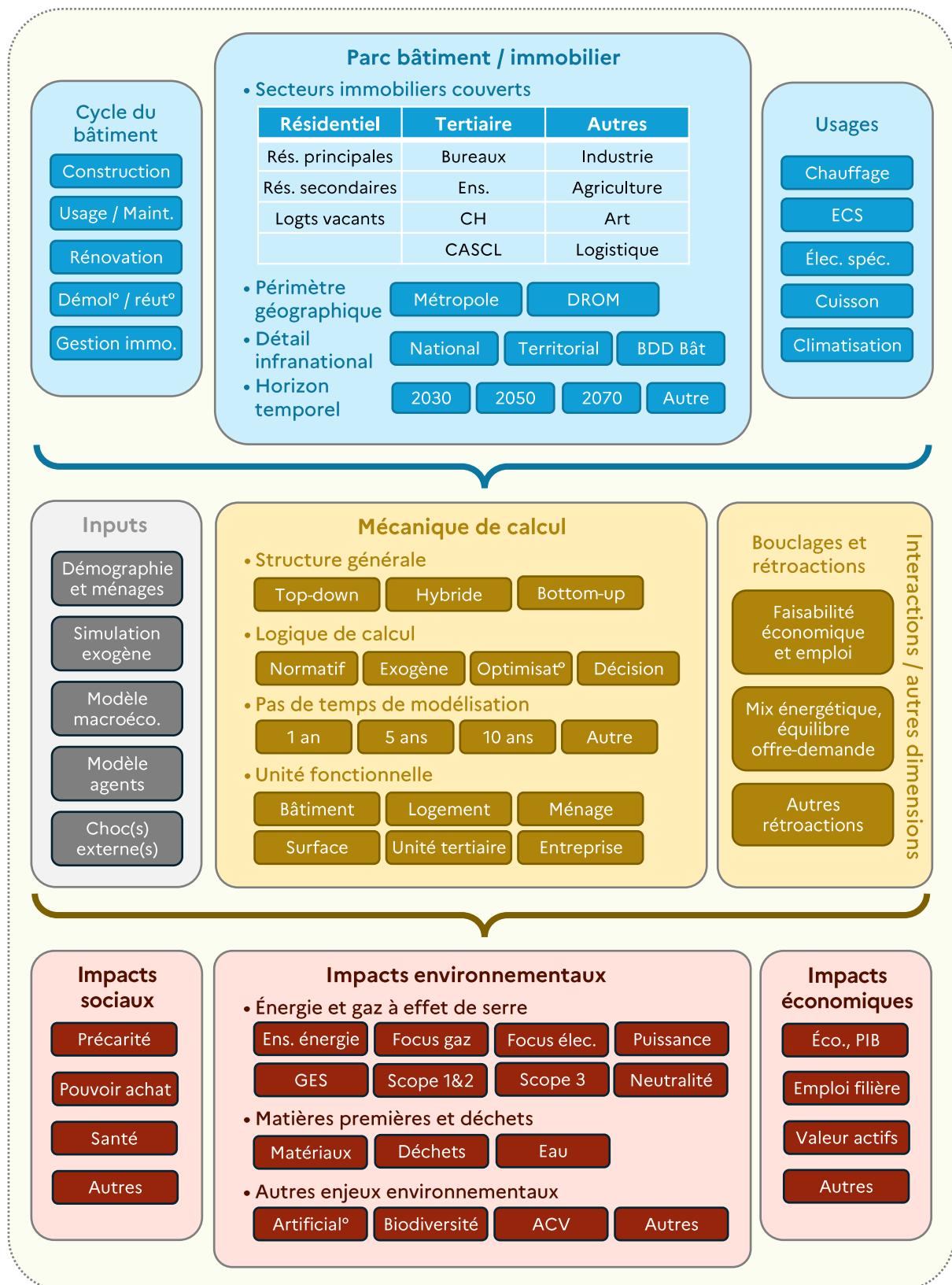


Figure 9 – Trame de la cartographie « Outils et modèles » des principales entrées, des principaux modes de calcul et des principaux impacts modélisés par les outils et modèles analysés

Au fil des catégories, cette cartographie vise à documenter les aspects précédents en distinguant trois grands blocs :

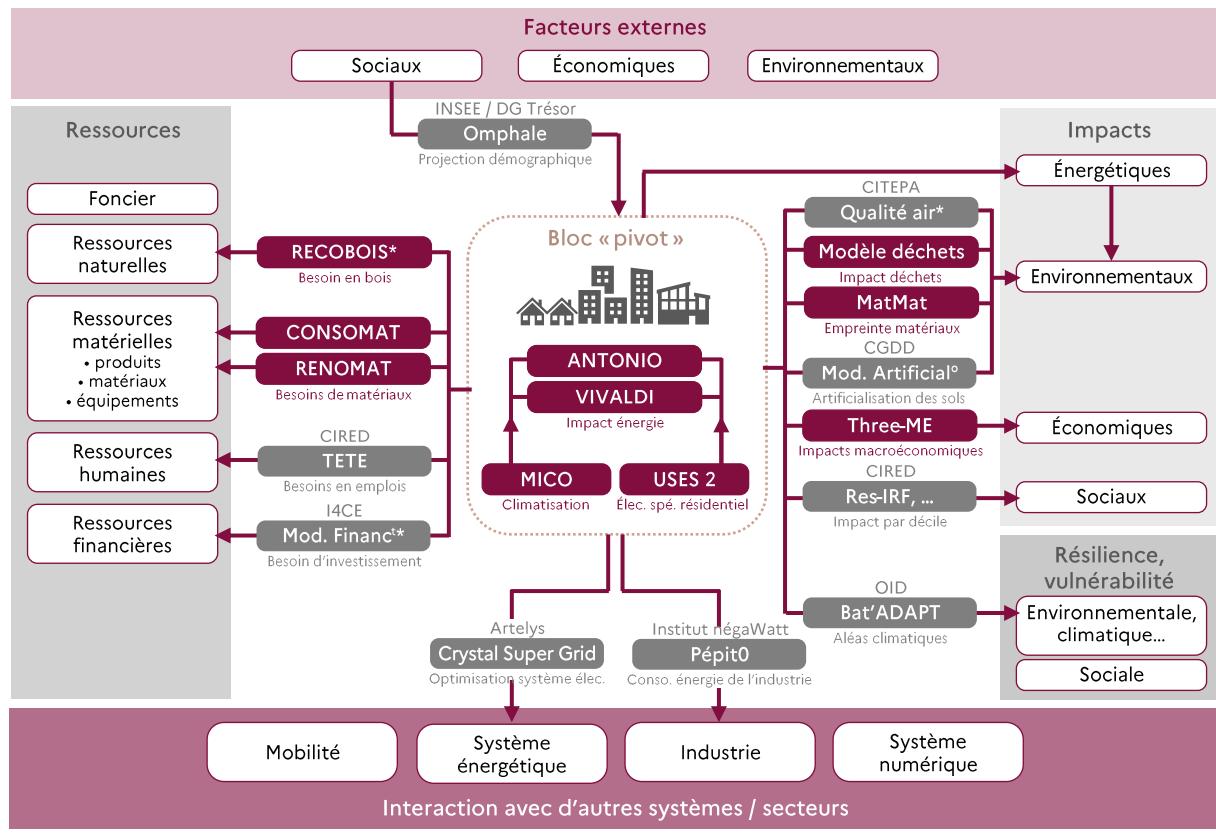
- **Le périmètre de description** : il s'agit de préciser la manière dont chaque outil ou modèle appréhende le secteur du bâtiment et de l'immobilier, du point de vue du parc effectivement couvert (résidentiel, inclus ou non les résidences secondaires et les logements vacants, tertiaire, inclus les différentes catégories, et autres types de bâtiments), du territoire pris en compte et de la maille territoriale à laquelle le modèle travaille, ainsi que son horizon temporel. On tient compte également dans ce bloc de la manière dont le modèle prend en compte ou non les différents aspects du cycle de vie d'un bâtiment, depuis la construction jusqu'à la démolition, inclus la question de la rénovation, et sa gestion immobilière, ainsi que les différents usages couverts dans la consommation liée à l'occupation des bâtiments.
- **La mécanique de modélisation** : la méthode de calcul est appréhendée sous l'angle de structure générale du modèle (top-down, bottom-up ou hybride) et de sa logique de calcul elle-même, en distinguant des logiques de simulation plutôt fermée et normative ou ouverte à des hypothèses exogènes, d'optimisation, que ce soit sous l'angle par exemple de calculs d'équilibre ou d'une approche agent-based, et d'aide à la décision par la modélisation de leurs impacts. Le pas de temps principal auquel travaille le modèle est également pris en compte, ainsi que le type d'unité fonctionnelle à laquelle ou auxquelles il recourt pour décrire le parc de bâtiments (en lien avec la cartographie « champ et paramètres »). En lien avec cette mécanique interne, la cartographie cherche à capter l'existence dans le modèle de boucles permettant notamment de calculer des rétroactions, typiquement du point de vue de l'économie ou, plus spécifiquement, de l'interaction entre le secteur du bâtiment et l'équilibre du système électrique – mais d'autres bouclages, par exemple sur la cohérence entre bâtiment et transports, peuvent aussi être envisagés ; on décrit également, pour finir, l'existence lorsqu'ils peuvent être identifiés d'inputs eux-mêmes modélisés, lorsque l'outil considéré s'alimente de données produites par exemple par une modélisation démographique ou une modélisation macroéconomique pour fixer ses propres hypothèses d'évolution de la population ou de croissance.
- **L'étendue des impacts environnementaux, économiques et sociaux** pris en compte ou résultant du calcul : dans ce troisième bloc, l'objectif est de caractériser les résultats que vise à produire chaque outil ou modèle, en se centrant sur les impacts environnementaux qui sont au cœur de la problématique de projection de la transition écologique du secteur. Ceux-ci recouvrent d'abord la consommation d'énergie (en général ou plus spécifiquement appliquée aux vecteurs gaz ou électricité, avec pour ce dernier un calcul ou non en puissance), et les émissions de gaz à effet de serre associées, au périmètre du scope 1 et 2 ou également du scope 3, et dans le cadre d'un objectif de neutralité carbone ou non. Les impacts environnementaux peuvent également recouvrir des enjeux liés à la consommation de matériaux et aux déchets, et à la consommation d'eau ; d'autres aspects, touchant à des enjeux comme l'artificialisation des sols ou la biodiversité, ou à des méthodes comme le calcul en analyse cycle de vie (ACV) peuvent également être tracés. Du point de vue des impacts économiques et sociaux, le spectre est potentiellement large mais on identifie spécifiquement ici des sujets comme les indicateurs macroéconomiques, des considérations liées à l'emploi dans la filière ou à la valeur immobilière dans le premier volet, et des enjeux de précarité et d'inégalités, de pouvoir d'achat et de santé dans le second.

L'objectif de cette cartographie est moins de caractériser sous cette forme chaque modèle – la description plus qualitative proposée dans les fiches en annexe lui étant privilégiée – mais plutôt de comptabiliser par ce moyen le nombre de modèles s'inscrivant dans chaque catégorie, ce comptage permettant de visualiser les « points chauds » (c'est-à-dire les choix méthodologiques adoptés par de nombreux modèles dans l'écosystème) comme les éventuelles lacunes.

4.4. Cartographie « Chaînages et couplages »

La dernière cartographie porte, une fois le périmètre et les modalités de calcul de chacun des outils et modèles caractérisé, sur la manière dont certains peuvent s'articuler. L'objectif de cette cartographie est d'identifier les liens entre les modèles existants et la nature de ces liens, afin d'analyser la capacité des différents outils repérés à produire, lorsqu'ils fonctionnent en système, une matière prospective plus riche qu'ils ne le font séparément. Contrairement aux précédentes, cette cartographie n'a toutefois pas pu être développée à l'échelle de l'ensemble des outils analysés. En effet, les modèles existants ayant été largement développés par des organisations différentes sans articulation formelle, les liens n'existent pas (ou pas encore) entre la majorité des modèles. Ainsi, les chaînages et bouclages visés par cette approche cartographique ne forment pas véritablement une image globale à l'échelle de l'ensemble de l'écosystème étudié.

Cette image peut en revanche émerger à l'échelle plus réduite d'écosystèmes de modélisation spécifiques. En pratique, seuls quelques acteurs ont développé une démarche d'intégration de différents modèles. C'est notamment le cas du CSTB, qui développe ou développe de très nombreux modèles. C'est également le cas d'organismes qui sont en mesure de mobiliser un nombre important d'outils et de modèles qu'ils ont développé en propre ou fournis par d'autres porteurs pour la production de trajectoires complètes : de la DGEC, pour la réalisation des trajectoires de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), ou encore de l'ADEME, par exemple pour la réalisation des scénarios de son étude *Transition(s) 2050*. C'est l'écosystème particulièrement intégré formé par cette suite d'outils et de modèles qui a servi pour l'illustration de cette démarche de cartographie, comme illustré par la figure 10.



* Modèles non traités dans le cadre de la présente étude.

Figure 10 – Cartographie des chaînages et bouclages d'outils réalisés par l'ADEME pour l'exercice *Transition(s) 2050*

L'idée est que cette cartographie puisse être utile à l'ensemble de la communauté des modélisateurs, dans la mesure où elle permet, comme on le verra à l'étape des résultats, de pointer des questions pertinentes pour toute organisation souhaitant rapprocher son modèle d'autres outils. L'intention de cette cartographie est en effet, via la représentation des relations établies entre les différents modèles, de caractériser les liens existants mais surtout d'interroger les liens envisageables mais manquants.

En cohérence avec les approches cartographiques précédentes, elle illustre la manière dont, autour d'un cœur de modélisation, ou **bloc « pivot »** qui modélise l'évolution du parc résidentiel et tertiaire et de sa consommation d'énergie, différents modèles permettent ou non de (1) tenir compte de **facteurs externes** sociaux, économiques et environnementaux, par exemple pour disposer d'une projection démographique, (2) projeter, par rapport à cette évolution du parc de bâtiments, des besoins en **ressources** de différente nature (foncières, naturelles et matérielles, humaines, financières), (3) calculer différents **impacts** énergétiques, environnementaux (gaz à effet de serre et autres enjeux), économiques et sociaux et tenir compte d'enjeux de **résilience**, et (4) documenter l'**interaction avec d'autres secteurs**, ou systèmes, comme l'articulation entre occupation des bâtiments et besoins de mobilité, l'impact sur le secteur électrique ou la trajectoire de l'industrie, ou encore le rôle du numérique. Le rôle et le fonctionnement de la grande majorité des modèles mis en jeu sont décrits dans le chapitre suivant, et détaillés dans les fiches en annexe.

4. Présentation des modèles

Cette section présente une synthèse par modèle intégré dans l'analyse. Les outils sont présentés dans l'ordre alphabétique des porteurs (ou, lorsque ceux-ci sont plusieurs, du porteur considéré comme principal ou du premier par ordre alphabétique) puis, pour les porteurs dont plusieurs outils ont été analysés, dans l'ordre alphabétique des noms des outils (y compris les noms qui leur ont été donné dans le cadre de cette étude, pour ceux qui n'en disposent pas).

Au total, 45 (+3) outils, modèles ou démarches sont présentés, trois d'entre eux faisant l'objet de deux versions de l'outil, dans le cadre d'une évolution en cours au sein de l'ADEME. Une présentation plus détaillée de chaque outil est disponible en Annexe. Chaque fiche comporte une partie descriptive du modèle et une partie d'analyse à partir des questions structurant les cartographies. Cette analyse du positionnement vis-à-vis des questionnements de l'étude, reproduite ci-dessous après une brève présentation de chacun des outils, reflète le point de vue des auteurs de l'étude et n'engage en rien les porteurs des modèles.

Comme indiqué dans la présentation de la méthodologie, la sélection des outils présentés ici ne se veut pas nécessairement le reflet quantitatif de l'ensemble des modèles existants. Outre que différents outils ont pu ne pas être repérés, l'objectif de la sélection opérée de proche en proche a plutôt été de capter la diversité des approches, même si elle a permis de refléter dans la sélection les effectifs de différentes catégories : elle contient par exemple peu de modèles d'équilibre général ou macroéconomiques par rapport aux modèles de simulation de scénarios de transition à l'échelle nationale, et par rapport aux modèles de diagnostic et de simulation à l'échelle territoriale. Le parti-pris est de centrer l'analyse sur la démarche de modélisation qui a été au cœur des efforts de représentation prospective de la transition du secteur du bâtiment ces dernières années, à savoir la modélisation par simulation de trajectoires de transition énergétique : il s'agit donc à la fois d'essayer de faire le tour des outils s'inscrivant plus ou moins dans cette approche, pour identifier les enjeux qu'ils permettent de capter ou non et la manière plus ou moins diversifiée dont ils les traitent, et d'intégrer des outils représentatifs de la diversité d'approches autres que celle-ci, pour analyser les enrichissements de la vision prospective qu'ils apportent ou pourraient apporter.

Il convient par ailleurs de souligner, au préalable, que le même format de questionnement et de synthèse est ici appliqué à des situations d'une grande hétérogénéité, du point de vue de la nature des outils eux-mêmes comme du degré de prise d'information et d'analyse dont ils pu faire l'objet dans le cadre de l'étude. De ce fait, le niveau de détail et d'approfondissement porté par la présentation de chaque scénario, s'il cherche avant tout à refléter la richesse et l'intérêt de chaque objet étudié, est aussi pondéré par l'attention qui a pu lui être consacrée. Une certaine hétérogénéité peut aussi venir du fait que l'analyse des différents outils a pu avoir lieu à des étapes différentes de l'étude.

4.1. ANTONIO (ADEME)

Le modèle ANTONIO (trANSiTION ecologique des logements) permet de projeter à 2050, en France métropolitaine, les consommations d'énergie des différents usages dans les résidences principales. Il s'agit d'un outil technico-explicite de simulation de la trajectoire énergétique du secteur résidentiel et des émissions de gaz à effet de serre associées, basé sur une approche « bottom-up » d'agrégation des consommations des logements. Le modèle s'intéresse spécifiquement au secteur résidentiel, et ne porte que sur les résidences principales.

Par rapport aux modèles existants, l'outil intègre notamment les fonctionnalités suivantes : prise en compte de tous les usages dans un unique outil intégré, intégration des chauffages d'appoint, possibilité de paramétrier une sobriété contrainte sur des critères économiques ; lien entre les équipements de chauffage et d'eau chaude sanitaire, possibilité de lier le développement du gaz naturel à la présence actuelle des réseaux et celle des réseaux de chaleur urbains à la densité urbaine.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Il s'agit d'un outil énergie de simulation exploratoire à visée plutôt normative, fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite l'ensemble du secteur résidentiel (résidences principales) et couvre tous les usages de l'énergie à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050, au pas de dix ans.



Champs et paramètres

Le modèle **ANTONIO** travaille essentiellement sur les trois dimensions constitutives de la consommation d'énergie des bâtiments, à savoir :

- les **bâtiments**, avec un modèle de stock du parc de résidences principales, dont l'unité de traitement est le logement ;
- les **équipements**, avec un modèle de stock détaillé des systèmes de chauffage et d'eau chaude sanitaire, et des éléments relatifs à l'ensemble des autres usages de l'énergie dans le résidentiel ;
- les **ressources**, avec le calcul complet des consommations d'énergies associées à ces différents usages dans l'ensemble des segments du parc résidentiel considérés, et des émissions de gaz à effet de serre associées (en scope 1 et 2, voire en scope 3 via le module ACV) ;

L'outil couvre également en partie la dimension **population**, à travers les hypothèses démographiques pilotant l'occupation et les usages, construites à l'échelle des ménages. Il ne traite pas directement la dimension économie, même s'il intègre des caractéristiques socio-économiques dans la description des ménages, et n'aborde pas du tout la dimension des sols.



Chaînages et bouclages

Le modèle **ANTONIO** constitue, avec son pendant **VIVALDI** pour le tertiaire, le pivot de la suite d'outils mobilisés par l'**ADEME** pour la modélisation du secteur des bâtiments. À ce titre, il est connecté ou connectable avec de nombreux autres outils.

Il est d'abord chaîné, pour les données d'entrée sur la démographie, avec le modèle **Omphale**. Il est par ailleurs initialement calibré sur les données d'occupation des logements par les ménages de la base de données **Enerter**, mais conçu pour pouvoir également utiliser d'autres données d'entrée.

Le modèle s'alimente ensuite, pour atteindre une modélisation plus fine de certains usages, d'outils spécifiques : **USES 2** pour l'électricité spécifique, et **MICO** pour la climatisation.

Enfin, le modèle est ou peut être mis en relation avec de nombreux outils permettant respectivement :

- d'informer les liens avec les besoins en ressources, qu'il s'agisse de compétences et d'emplois (**TETE**), d'investissements (données d'I4CE) ou de matières premières (**CONSOMAT**, **RECOMAT**) ;
- de traiter les enjeux intersectoriels, par exemple avec le système électrique (via Crystal Super Grid, d'Artelys) ou l'industrie (PépitO) ;
- d'évaluer différents impacts environnementaux (**Modèle déchets**, MatMat à l'avenir pour l'empreinte matière et carbone, **Modèle artificialisation** du CGDD...) ou socio-économiques (**ThreeME**...).



Questions et enjeux

Du fait de son périmètre de modélisation et de la manière très technico-explicite dont il est construit, le modèle se prête assez mal, en soi, à explorer la plupart des questionnements identifiés. On peut cependant noter sa connexion avec les enjeux d'analyse en cycle de vie (via son module dédié), de lutte contre la précarité énergétique (en lien avec sa modélisation de la rénovation), ou la sobriété qui peut être explicite introduite dans le jeu d'hypothèses. Il pourrait également se prêter à des analyses de sensibilité sur l'évolution des besoins, ou sur un éventail de projections démographiques.

Les différents chaînages et couplages dont il fait ou pourrait faire l'objet montrent en revanche comment un modèle de ce type fournit, par la finesse de la description technique qu'il mobilise et la nature directe et « traçable » des calculs qu'il développe, une base intéressante pour explorer, via des outils complémentaires, différents questionnements au niveau **technique** (par exemple sur les infrastructures de réseau), **socio-économique** (par exemple sur les aspects liés au budget des ménages, puisqu'il intègre ce paramètre dans son état descriptif), **sociétal** voire **territorial** (puisque qu'il s'appuie sur une catégorisation pertinente à la maille IRIS). Il semble plus difficile, même si l'absence d'outils dans ce domaine ne permet pas d'être plus précis, de le relier à des enjeux de réponse aux crises.

4.2. CONSOMAT (ADEME)

Le modèle projette les besoins en ressources matérielles liées à la construction neuve des logements (résidences principales, EPHAD inclus) et d'une partie du secteur tertiaire à 2050 (commerces de grande distribution, hôtels, enseignement, bureaux). Le modèle couvre les consommations liées au gros et second œuvre, mais pas celles liées aux équipements électriques, électroniques et de génie climatique.

Pour le secteur du logement, l'approche repose sur la représentativité de plus de 80 macrocomposants (ex : une cloison intérieure en plaques de plâtre, un mur extérieur en briques, ...) ; celle-ci permet de représenter finement les parts de marché des différentes solutions constructives. Pour le tertiaire CHEB, la modélisation repose sur la définition de 16 typologies de bâtiments représentatives d'un mode constructif couramment observé.

Parmi les perspectives d'évolution figurent : un élargissement à d'autres branches tertiaires (lorsque les données d'observation seront disponibles), étendre le périmètre géographique aux territoires ultramarins, coupler l'analyse des quantités de matière consommée par le secteur du bâtiment à une analyse sur les quantités de matière effectivement disponibles ou encore estimer les types de déchets qui seront ensuite

générés afin d'identifier les filières de valorisation les plus impactantes. Le modèle a été développé par le CSTB dans le cadre d'une étude pour l'ADEME, il nourrit le développement du modèle BTPFlux.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Il s'agit d'un outil de projection des besoins en ressources matérielles liées à la construction de bâtiments (matériaux de gros et second œuvre), fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite l'ensemble du secteur résidentiel (résidences principales) et une partie du secteur tertiaire, à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050.



Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle du modèle est le bâtiment type, ses résultats s'expriment en tonnage de matériaux.



Chaînages et bouclages

Le modèle **CONSOMAT** a été intégré dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour *Transition(s) 2050*. Il utilise en données d'entrées des volumes de construction et de rénovation issus d'**ANTONIO** et **VIVALDI**.

Dans la mesure où il projette une demande en matériaux, il pourrait à l'avenir être utilisé dans des bouclages sur la disponibilité des ressources matérielles, si des modèles d'offre étaient disponibles.



Questions et enjeux

Le modèle pourrait participer à une réflexion sur les enjeux de disponibilité des ressources matérielles et conflits d'usage, et sur des tensions/ruptures d'approvisionnement.

4.3. MICO (ADEME)

Le modèle MICO (Modélisation des Impacts de la Climatisation sur la consommation) vise à modéliser de manière fine l'évolution de la consommation d'énergie dans les bâtiments liée à la climatisation. Cet outil a été développé pour renforcer la modélisation spécifique de l'usage climatisation pour l'exercice *Transition(s) 2050*. Le modèle couvre l'ensemble du secteur résidentiel (y compris les résidences secondaires) et du secteur tertiaire. Le modèle couvre la France entière, c'est-à-dire métropole et territoires d'outre-mer compris, en tenant compte de leur spécificité vis-à-vis des besoins en climatisation.

Il s'agit a priori du premier modèle dans sa catégorie. Son calage est relativement fin, dans la mesure où son point de départ à 2020 s'est appuyé sur les données d'une enquête spécifique menée par l'ADEME pour documenter en détail les consommations d'énergie et les taux d'équipement existants pour la climatisation.

Ce modèle est une première étape dans la modélisation spécifique de la climatisation en France. Il présente donc naturellement de nombreux axes d'amélioration, parmi lesquels on peut citer l'enjeu d'une meilleure prise en compte des évolutions du climat, dans la mesure où ce paramètre clé peut faire l'objet d'incertitudes importantes et la possibilité de mieux prendre en compte le comportement thermique des bâtiments pour le confort d'été. Des améliorations ont été apportées sur ces points pour le secteur résidentiel en 2023.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

MICO est un outil énergie de simulation exploratoire à visée prospective, fondé sur une description physique bottom-up explicite. Il traite l'usage spécifique de la climatisation sur l'ensemble du parc résidentiel et tertiaire et du territoire, avec une différenciation par zone climatique, à l'horizon 2050 et au pas de 10 ans à partir d'un calage en 2020.



Champs et paramètres

L'outil travaille essentiellement dans trois dimensions : les bâtiments, qu'il représente par unités et surfaces de plancher pour estimer les besoins de froid en fonction de leurs caractéristiques, les équipements de climatisation, dont il représente les caractéristiques techniques, le taux de déploiement et les conditions d'usage, et les ressources au sens du besoin de froid en énergie utile et de sa traduction, en lien avec les deux dimensions précédentes, en consommation d'énergie finale.



Chaînages et bouclages

Le module **MICO** a été développé pour alimenter directement avec des résultats spécifiques et détaillés sur la demande d'énergie finale liée à la climatisation les modèles d'agrégation de la consommation d'énergie pour tous les usages dans le résidentiel (**ANTONIO**, qui toutefois ne traite pas les résidences secondaires) et dans le tertiaire (**VIVALDI**).

Il n'est en l'état pas relié à d'autres modèles et aucune évolution en matière de chaînage ou de bouclage n'est envisagée à ce stade.



Questions et enjeux

De par son champ très spécifique, cet outil est assez peu relié aux différents questionnements prospectifs identifiés dans cette étude. Il peut toutefois être directement rapproché de l'enjeu que représente l'adaptation du parc de bâtiments à l'évolution climatique, de même que celui des dynamiques de différenciation qui peuvent intervenir entre territoires sous l'angle climatique. Il permet aussi d'interroger, sur l'usage spécifique qu'il traite, la question du niveau de sobriété.

Il est également intéressant, dans la mesure où il couvre la Corse et l'ensemble de l'outre-mer et traite avec un niveau de détail important d'un usage particulièrement sensible dans certains des territoires concernés, pour informer plus largement la vision prospective spécifique à ces zones.

4.4. MODEIRE (ADEME / Association négaWatt)

Le modèle MODEIRE est l'adaptation pour les besoins de l'ADEME, en particulier de son étude *Transition(s) 2050*, de l'outil négaMat développé par l'Association négaWatt pour modéliser la partie matériaux de ses scénarios. Basé sur un découpage en secteurs et sous-secteurs de l'économie française et sur une quantification des besoins en matériaux en entrée et en sortie de chacun de ces sous-secteurs en fonction de leur activité, il permet de décrire, sur la base d'une caractérisation des flux en tonnage pour une année de référence, leur évolution en fonction de différentes hypothèses sur la demande finale et intermédiaire, sur l'efficacité des processus de production, et sur les substitutions de matières premières. Il fournit une trajectoire au pas annuel et projetée jusqu'à 2050 ou 2070, comptabilisant la consommation intérieure de matières premières et les consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre associées.

L'outil traite la question des matériaux dans les bâtiments sous l'angle du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP), la consommation de matériaux pour la demande finale en équipements et biens relevant des secteurs résidentiel et tertiaire étant quant à elle couverte, mais pas directement rapprochée des bâtiments. Ce volet BTP permet de quantifier les besoins de matériaux associés aux trajectoires de construction, de rénovation et réhabilitation, et de démolition.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Il s'agit d'un outil de simulation exploratoire, techno-explicite et désagrégé de l'évolution de l'empreinte matière de l'ensemble de l'économie française, avec la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre associées, fournissant des résultats au pas annuel jusqu'à un horizon 2050 ou 2070.



Champs et paramètres

Du point de vue du champ, ce modèle se concentre naturellement sur les deux dimensions se rapportant physiquement le plus directement aux matières, dans lesquelles il ne traite le bâtiment que comme un secteur parmi d'autres : la **dimension des ressources**, essentielle dans son principe de modélisation centré sur une unité fonctionnelle liée aux tonnages de matériaux, où il couvre également l'énergie et les émissions de gaz à effet de serre, et celle des **équipements** à travers l'ensemble de la production et des échanges. Il intègre aussi pleinement la **dimension bâtiments**, via des unités de construction nouvelle et de gestes de rénovation appliqués à des surfaces de bâtiments pour différents segments du parc.



Chaînages et bouclages

Le modèle **MODEIRE** participe de la suite d'outils mobilisés par l'ADEME pour l'élaboration de ses scénarios, mais fait l'objet de difficultés de chaînage avec d'autres modèles touchant au bilan matériaux du bâtiment comme **CONSOMAT** ou **RENOMAT**, du fait de différences de segmentation ou de calcul qui font l'objet d'un traitement. Il pourrait aussi être relié à **BTPFlux**.



Questions et enjeux

Cet outil s'inscrit, avec quelques autres, dans un développement relativement récent visant à compléter les efforts de modélisation de trajectoires de transition en énergie au périmètre domestique national par une caractérisation la consommation intérieure de matières premières française en matériaux et en émissions de gaz à effet de serre, répondant ainsi à un questionnement qu'on pouvait considérer comme nouveau il y a une dizaine d'années. Même s'il

ne se prête dès lors pas très directement à traiter d'autres nouvelles questions, des passerelles peuvent toutefois être identifiées vers certains enjeux.

Tout d'abord, dans le même registre de la **complétude technique**, il présente l'intérêt de traiter au sein du même module les besoins associés au bâtiment et ceux associés aux infrastructures. Ensuite, dans le champ des **dynamiques sociétales**, sans entrer dans cette question par les modes de vie, il intègre directement des leviers liés à la sobriété, à l'économie circulaire et à l'évolution des usages. Enfin, même s'il est fondé sur un mode de simulation continuiste, qui ne vise pas à représenter une situation de **réponse aux crises**, il fournit a minima une approche pour s'interroger sur la robustesse vis-à-vis du risque de tension ou de rupture d'approvisionnement sur des ressources.

4.5. Modèle biomasse (ADEME)

L'outil a pour objectif de modéliser l'adéquation (ou non) entre ressource et usages énergétiques et matériaux (donc hors alimentaire) de la biomasse sous ses différentes formes (agricole, sylvicole, biodéchets). Les usages portent donc en partie sur le bâtiment, mais pas seulement.

La modélisation porte sur les usages matière et énergie (en arbitrant pour chaque biomasse les usages envisagés), et des process de transformation des différents types de biomasse (en précisant les rendements matière et énergie). Elle part de la ressource (bois, ressources agricoles, déchets, coproduits/sous-produits...) et des usages, puis des itérations sont nécessaires pour arriver à adéquation offre/demande (arbitrage usage matière/énergie, et filières de valorisation) en tenant aussi compte de l'enjeu séquestration carbone (traité dans un outil externe à partir des modifications de surfaces)

Il s'agit d'un outil interne ADEME.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Il s'agit d'un outil de projection et d'allocation d'une ressource matérielle (la biomasse) entre ses différents usages, fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite l'ensemble des usages de la biomasse, à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050.



Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle du modèle est le volume de matériau (tonnes).



Chaînages et bouclages

Le modèle a été intégré dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050. Il permet de documenter la disponibilité en bois, et, à ce titre, a permis un des seuls bouclages matière dans le secteur bâtiment dans Transition(s) 2050.



Questions et enjeux

Le modèle pourrait participer à une réflexion sur les enjeux de disponibilité des ressources matérielles et conflits d'usage, et sur des tensions/ruptures d'approvisionnement.

4.6. Modèles et AFMD (ADEME)

Le modèle Déchets est un tableau Excel interne à l'ADEME permettant une modélisation prospective des flux de déchets et de leur valorisation. Il est basé sur les statistiques des déchets remontant des territoires (bottom-up) avec un niveau de détail très fin (l'inconvénient, cependant, est d'avoir des paramètres restreints dépendants des enquêtes « facilement » accessibles à l'ADEME). Les déchets du bâtiment (démolition, rénovation, construction neuve) sont inclus, mais pas ceux des travaux publics.

L'évolution des flux de déchets ne prend pas en compte l'évolution du système productif et de consommation puisque la modélisation démarre avec les déchets collectés. Par conséquent, la composition matière des déchets n'est pas projetée de manière cohérente pour évaluer le potentiel des produits de valorisation des déchets (recyclage et énergie).

Ses lacunes poussent la Direction Economie Circulaire de l'ADEME à développer un outil Analyse Flux Matière Dynamique afin d'avancer vers une modélisation plus cohérente et plus robuste. L'analyse de flux de matières dynamique (AFMD) vise à quantifier les stocks et flux de matières dans un périmètre géographique et temporel donné. Appliquée à l'échelle nationale, l'approche permet d'estimer les flux entrants de matériaux visés (imports, production locale) permettant de répondre à une demande en produits et services (par exemple, les automobiles, les bâtiments, etc.), ainsi que l'accumulation de

matériaux dans l'économie au fil du temps, et la génération de déchets par typologie de produits et/ou de matériaux.

L'outil AFMD de l'ADEME accordera une attention particulière à la gestion de fin de vie des produits pour décrire des différents modes de collecte et de traitement des déchets, ainsi que les produits de leur valorisation sous forme de matière et d'énergie. Il permettra une meilleure représentation de l'évolution de la composition des déchets, une vision dynamique de la sortie des biens hors usage, une modélisation du stock de matières dans l'économie et une vision intersectorielle des flux de matières.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Il s'agit d'un outil de projection des déchets produits par l'économie française, fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite d'une partie des déchets français, à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050.



Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle du modèle est le volume de déchets (tonnes)



Chaînages et bouclages

Le modèle a été intégré dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050. Il intègre les résultats sur les volumes de construction et de rénovation issus des modèles ANTONIO et VIVALDI.



Questions et enjeux

Le modèle pourrait participer à une réflexion sur les enjeux de disponibilité des ressources matérielles.

4.7. Matmat et ImpactsConso (ADEME)

Modèle d'évaluation des empreintes matières et carbone de scénarios prospectifs, fondé sur une approche top-down (matrices entrée-sortie de l'économie française), à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine. Appliquée aux résultats de modèles macro-économiques comme ThreeMe, l'analyse Entrée-Sortie étoffe considérablement la mesure de l'impact matière des changements économiques et technologiques considérés.

Le modèle a été utilisé pour la première fois dans le cadre de l'exercice de prospective ADEME Transition(s) 2050. Il est également utilisé pour la Stratégie Nationale Bas Carbone 3.

Le secteur bâtiment est inclus dans le secteur Construction qui englobe les activités de construction des Bâtiments et le Génie Civil. Des travaux ont été engagés pour désagréger le secteur de la construction, de manière à mieux représenter et isoler à l'avenir en prospective les investissements dans la construction de bâtiments, dans la rénovation et dans le génie civil.

Le modèle MatMat pourra s'articuler avec l'outil ImpactsConso en cours de développement dédié à l'évaluation environnementale de la consommation en France. Il a pour objectifs de fournir un état des lieux des impacts environnementaux de la consommation française actuelle de biens et services (couverture complète de l'économie, construction et infrastructures comprises), avec une caractérisation des impacts et identifier les déterminants des impacts de la consommation des ménages

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Il s'agit d'un outil de projection de l'empreinte matière et carbone de l'économie française, fondé sur une approche top-down (matrices entrée-sortie de l'économie française), à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à horizon 2050.



Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle du modèle est le flux (monétaire ou physique) entrant et sortant de l'économie française.



Chaînages et bouclages

Le modèle a été intégré dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050. Il intègre les résultats sur les volumes de construction et de rénovation issus des modèles ANTONIO et VIVALDI. Un bouclage avec le modèle ThreeME est opéré. ThreeME permet de considérer les effets de transferts d'activité et de

consommation dans l'économie via une modélisation des comportements des agents économiques et des effets prix / compétitivité. Au-delà des enjeux macroéconomiques, le modèle ThreeME intègre également les transformations des systèmes énergétiques via des modules sectoriels dédiés. Le modèle MatMat concatène quant à lui les expertises sectorielles de l'ADEME sur la matière. Le bouclage entre les deux modèles permet ainsi de proposer une évaluation de scénarios intégrés énergie-matière-économie avec un réalisme technique et une cohérence macroéconomique.

Questions et enjeux

Le modèle pourra participer à une réflexion sur les enjeux de disponibilité des ressources matérielles.

4.8. RENOMAT (ADEME)

Le modèle projette les besoins en ressources matérielles (gros et second œuvre) liées à la rénovation BBC des logements à 2050. Il fonctionne par simulations énergétiques de bâtiments types (basés sur la typologie PACTE), à la fois pour le parc de maisons individuelles et le parc de logements collectifs. Des typologies et des cas types de bâtiments ont été définis et les simulations ont permis de déterminer les bouquets de travaux et niveaux de performance nécessaires pour atteindre le niveau BBC. À partir de ces résultats et des métrés de chaque bâtiment type, les quantitatifs de matériaux ont été établis en considérant différents scénarios de rénovation.

Une piste d'approfondissement est l'ouverture à des gestes isolés de rénovation et aux besoins en matériaux associés à la rénovation non thermique et aux équipements de génie climatique. Elle pourra être effectuée dans la cadre du modèle **BTPFlux** du CSTB.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Il s'agit d'un outil de projection des besoins en ressources matérielles liées à la rénovation BBC de logements (matériaux de gros et second œuvre), fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite l'ensemble du secteur résidentiel (résidences principales), à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050.

Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle du modèle est le bâtiment type, ses résultats s'expriment en tonnage de matériaux.

Chainages et bouclages

Le modèle CONSOMAT a été intégré dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050. Il utilise en données d'entrées des volumes de rénovation issus d'ANTONIO.

Dans la mesure où il projette une demande en matériaux, il pourrait à l'avenir être utilisé dans des bouclages sur la disponibilité des ressources matérielles, si des modèles d'offre étaient disponibles.

Questions et enjeux

Le modèle pourrait participer à une réflexion sur les enjeux de disponibilité des ressources matérielles et conflits d'usage, et sur des tensions/ruptures d'approvisionnement.

4.9. USES 2 (ADEME)

Le modèle permet de projeter à 2030, en France métropolitaine, la consommation énergétique moyenne des principaux appareils présents dans les logements. Il recouvre les catégories d'équipements suivantes : froid, lavage, cuisson, entretien et électronique.

Le modèle permet de projeter à 2030, en France métropolitaine, la consommation énergétique moyenne des principaux appareils présents dans les logements. Il recouvre les catégories d'équipements suivantes : froid, lavage, cuisson, entretien et électronique. USES 2 est la version mise à jour pour *Transition(s) 2050*, en 2020-2022, d'un modèle USE développé en 2014.

Le modèle couvre 23 catégories d'appareils qui représentent environ 85 % des consommations électrodomestiques totales (hors éclairage, chauffage, ECS, climatisation, ventilation et auxiliaires de chaudières). Il s'agit d'un modèle très détaillé permettant de calibrer finement chaque équipement.

Des réflexions sont en cours pour intégrer cette modélisation dans un ensemble plus large de modélisation des flux d'équipements et biens des ménages français, et prolonger les projections à 2060.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

USES 2 est un outil énergie de simulation exploratoire à visée prospective, fondé sur une description physique bottom-up explicite. Il traite des équipements d'électricité spécifique et de cuisson des résidences principales sur le territoire métropolitain, à l'horizon 2030 et au pas de 5 ans à partir d'un calage en 2015.



Champs et paramètres

Le modèle représente des ménages, dont il documente les stocks d'équipements ainsi que les usages. Il ne propose pas de diversité de ménages, du fait notamment de l'absence de données d'observation suffisamment fines.



Chainages et bouclages

Les résultats du modèle USES 2 ont été intégrés dans le cadre de *Transition(s) 2050* dans le modèle ANTONIO, et projetés à 2050.

Le modèle intègre des données de projections du nombre de ménages émanant des projections de population de l'INSEE et du SDES.

À l'avenir, du fait qu'il documente les flux d'équipements, il pourrait être utilisé dans une perspective de bouclage plus global sur les besoins en matière de la société française. Il pourrait également être utilisé pour documenter les factures d'énergie moyennes des ménages.



Questions et enjeux

Le modèle permet de représenter les évolutions de mode de vie et leurs incidences sur l'utilisation des équipements électriques et électroniques du quotidien. Il permet notamment d'alimenter la réflexion sur l'évolution des consommations liées au numérique dans les foyers, et sur l'impact de la politique sur l'étiquette énergie. Il n'est cependant pas possible d'aller au-delà des comportements moyens des ménages, et donc de documenter des enjeux comme ceux de la précarité énergétique.

4.10. VIVALDI et Data centers (ADEME)

Le modèle permet de projeter à 2050, en France métropolitaine, les consommations d'énergie des différents usages des secteurs tertiaires CEREN et hors CEREN. Les usages inclus dans le modèle sont : le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS), la climatisation, l'électricité spécifique (dont éclairage) et la cuisson.

Le modèle permet la prise en compte de tous les usages dans un unique outil intégré. Il est complété de modules spécifiques, notamment sur l'éclairage public et les data centers. Le modèle est structuré par branche CEREN, chacune faisant l'objet d'une feuille de calcul spécifique.

Parmi ses points forts, on peut citer l'intégration de l'ensemble des usages et des branches tertiaires. Concernant spécifiquement le module relatif aux data centers, il s'agit de la première projection de ce type à notre connaissance en France (sur une branche d'activité à fort enjeu du point de vue de l'évolution des consommations).

Des évolutions sont en cours pour prolonger le modèle à 2060 et lui permettre de mieux représenter l'impact du Dispositif Eco-Energie Tertiaire. Par ailleurs, des développements complémentaires sont prévus pour réaliser un modèle spécifique aux data centers.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Il s'agit d'un outil énergie de simulation exploratoire à visée plutôt normative, fondé sur une description par branche tertiaire. Il traite l'ensemble du secteur tertiaire et couvre tous les usages de l'énergie à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050, au pas de dix ans.



Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle du modèle est le mètre carré de surface chauffée des branches CEREN. La caractérisation par surface chauffée ne permet pas de documenter directement l'artificialisation des sols associée à la construction neuve.



Chainages et bouclages

Le modèle VIVALDI constitue, avec son pendant ANTONIO pour le résidentiel, le pivot de la suite d'outils mobilisés par l'ADEME pour la modélisation du secteur des bâtiments. À ce titre, il est connecté ou connectable avec de nombreux autres outils.

Le modèle s'alimente des résultats des projections de population globale et de population active de l'INSEE, et l'outil **MICO** pour la climatisation.

Enfin, le modèle est ou peut être mis en relation avec de nombreux outils permettant respectivement :

- d'informer les liens avec les besoins en ressources, qu'il s'agisse de compétences et d'emplois (**TETE**), d'investissements (données d'I4CE) ou de matières premières (**CONSOMAT, RECOMAT**);
- de traiter les enjeux intersectoriels, par exemple avec le système électrique(via **Artelys Crystal Super Grid**) ou l'industrie(**Pépit0**);
- d'évaluer différents impacts environnementaux (Modèle déchets, MatMat à l'avenir pour l'empreinte matière et carbone, Modèle artificialisation du CGDD...) ou socio-économiques(ThreeME...).

Questions et enjeux

Le modèle permet de capter des évolutions liées à la démographie (vieillissement de la population, évolution de la population en âge d'aller à l'école...), au numérique (data centers), aux modes de vie (évolution du commerce). Cependant, sa représentation par branche et non sous-branche (ex: différencier les surfaces d'école de celles de l'enseignement supérieur...) ne lui permet pas de documenter finement les dynamiques.

4.11. Artelys Crystal Super Grid (Artelys)

Ce modèle propose une simulation et une optimisation technico-économique de la trajectoire énergétique, et de l'évolution des réseaux, intégrant la demande des bâtiments des secteurs résidentiel et tertiaire. Cet outil est d'une manière générale destiné à éclairer des enjeux de planification des systèmes énergétiques interconnectés, avec une attention particulière pour le système électrique. Dans le cadre d'un exercice de scénario énergétique global, il peut être utilisé pour évaluer les enjeux d'équilibre entre offre et demande, en lien avec différentes trajectoires de consommation ou différentes hypothèses sur le mix de production. C'est dans ce sens qu'il a été utilisé, en projetant notamment les enjeux associés à l'évolution des secteurs résidentiel et tertiaire, pour l'exercice *Transition(s) 2050* de l'ADEME.

L'outil étant modulaire, il peut fonctionner à différentes échelles géographiques. Le plus fréquemment il est utilisé à la maille régionale, nationale ou zone de marché, en prenant en compte les interactions entre zones voisines.

La modélisation prend en compte la variabilité météorologique: les optimisations sont réalisées en espérance en minimisant les coûts en moyenne sur neuf scénarios météo appliqués à toutes les années modélisées.

Les principaux points forts du modèle concernent sa capacité de modélisation du dispatch optimal en fonction des contraintes fixées, son caractère multi-énergie, et sa fonction d'optimisation de trajectoire du point de vue des capacités et des coûts.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Le modèle **Artelys Crystal Super Grid** est un outil de simulation et d'optimisation du système énergétique orienté réseaux, qui ne porte pas spécifiquement sur le bâtiment mais permet d'intégrer de façon fine les enjeux liés à la demande d'énergie de ce secteur, notamment par la présence d'actif dédiés à la modélisation de certains usages et de la flexibilité qu'ils peuvent apporter au système.

Champs et paramètres

Cet outil intervient pour l'essentiel sur la dimension des consommations d'énergie, avec une extension à celle des émissions de gaz à effet de serre du fait d'un lien avec le système de production d'énergie. Il capte pour cela des éléments descriptifs relatifs aux usages et aux bâtiments eux-mêmes, mais reste dans ces champs à un niveau relativement agrégé en termes d'unités fonctionnelles et de leviers d'action envisagés, ceux-ci intervenant pour l'essentiel de façon exogène dans une formation de la demande que le modèle considère in fine.

Chaînages et bouclages

Le modèle intervient dans le système complet de modélisation mobilisé par l'ADEME, et permet une forme de bouclage entre le secteur du bâtiment et celui de l'énergie au prisme des consommations d'énergie et des émissions, mais ce bouclage reste peu détaillé et peu intégratif. En particulier, l'optimisation appliquée par cet outil du point de vue de l'énergie peut faire remonter une information sur l'évolution des bâtiments et de leur usage, mais ne permet pas d'élargir à d'autres aspects relatifs aux bâtiments la démarche d'optimisation.

Questions et enjeux

Cet outil de modélisation à l'échelle nationale est construit pour intégrer différents facteurs prospectifs relatifs à la démographie, à la demande et à l'offre qu'ils traitent toutefois selon une perspective relative à l'énergie et aux réseaux, et pas spécifiquement aux bâtiments. Il se prête assez peu à l'exploration de nouveaux questionnements techniques, socio-économiques ou sociétaux – même s'il permet de couvrir à travers certains proxys des aspects tels que la sensibilité aux évolutions climatiques –, et encore moins à traiter des enjeux relatifs aux crises. Il permet en revanche dans une certaine mesure, par sa structure régionalisée et son application possible à différents territoires, de prendre en compte une part de différenciation territoriale et de couvrir des territoires non métropolitains.

4.12. Outils territoriaux (Artelys)

Artelys développe, à partir d'une structure commune, différents outils adaptés aux besoins de modélisation pour répondre aux enjeux des collectivités, par exemple pour l'élaboration des schémas directeurs énergies. Il s'agit globalement d'outils de caractérisation et de simulation de trajectoires énergétiques à l'échelle des collectivités.

Les outils visent à répondre à différents enjeux des collectivités liés à leur trajectoire énergétique, comme :

- la bonne connaissance du territoire, en identifiant les secteurs les plus consommateurs, les logements les plus énergivores, ou en caractérisant les importations d'énergie ;
- la coordination des politiques publiques, en éclairant les effets croisés entre politiques de l'énergie, de la mobilité, et les impacts des projets d'aménagement, l'évolution des réseaux, les impacts des plans de déplacement urbain, etc. ;
- l'anticipation, en fournissant des évaluations sur l'intérêt territorialisé de développement de réseaux de chauffage urbain, de mobilisation de nouvelles sources d'énergie, d'intégration des réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur.

Les outils reposent sur une décomposition fine de la fourniture d'énergie et de la consommation par usage et par secteur. Ainsi un modèle de consommations détaillés par secteur, par usage et par énergie est construit à la maille IRIS en s'appuyant sur un large ensemble de données spécifiques au territoire étudié.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Les différents outils déclinés par Artelys dans cette gamme territoriale s'inscrivent tous dans le registre de l'aide à la décision par la simulation de trajectoires. Cette simulation se construit autour d'une description centrée sur l'énergie, qui intègre selon les déclinaisons une caractérisation plus ou moins fine et complète de la trajectoire bâimentaire, à différents pas et horizons de temps, et couvrant plus ou moins de paramètres relatifs aux consommations, aux usages et aux impacts.

Champs et paramètres

La déclinaison d'outils territorialisés repose principalement sur la description aux fins de simulation et de planification de la dimension relative aux consommations d'énergie des bâtiments. Celle-ci peut recouvrir l'ensemble des consommations du secteur résidentiel et du secteur tertiaire, et peut aller, grâce à la flexibilité de l'approche, dans un niveau de désagrégation important. Cette dimension est renseignée par, et peut renseigner en retour différents paramètres relevant des dimensions infra ou supra, qu'il s'agisse dans le premier cas de la caractérisation des usages ou de la typologie des bâtiments, et dans le second d'éléments relatifs à la démographie ou aux coûts, ces aspects étant toutefois couverts de façon plus agrégée.

Chaînages et bouclages

L'échange n'a pas porté spécifiquement sur cette dimension, si bien qu'aucun chaînage ou bouclage déjà mis en œuvre n'ont été identifiés. On peut toutefois noter que la nature descriptive, modulaire et flexible des outils concernés se prête assez bien à leur articulation avec différents modèles dès lors qu'ils sont eux-mêmes suffisamment descriptifs et désagrégés.

Questions et enjeux

L'approche développée avec ces outils vise plutôt une application territoriale, ce qui peut apporter des réponses à des questionnements relatifs à la différenciation par territoire, ou permettre le traitement de territoires spécifiques, mais elle peut aussi s'appliquer à une vision remontant de l'échelle territoriale vers le national. Le caractère flexible de l'approche peut dès lors capter par exemple certains enjeux relatifs aux dimensions sociales. Toutefois, d'une manière

générale, ces outils sont pour l'essentiel construits dans l'optique de décliner des facteurs prospectifs bien identifiés et bien couverts à l'échelle territoriale, plutôt que celle d'explorer de nouveaux enjeux prospectifs.

4.13. Modèle SnW (Association négaWatt)

Le modèle SnW forme, avec négaMat qui couvre les enjeux de consommation de matières premières et le modèle Afterres de l'association Solagro, qui traite les questions de forêt, d'agriculture et d'alimentation, une suite permettant de modéliser des trajectoires de transition complètes sur le périmètre de consommation et de production de l'économie française. Cet outil se concentre sur les consommations et la production d'énergie, et sur les émissions de gaz à effet de serre associées, appliquant à la construction d'une trajectoire pour chacun des secteurs de l'économie la même démarche d'exploitation des potentiels de sobriété, d'application de l'efficacité, et de substitution systématique des énergies de stock (énergies fossiles et énergie nucléaire) par les énergies de flux (énergies renouvelables). L'outil intègre des onglets spécifiques au secteur du bâtiment, permettant notamment d'appliquer au parc résidentiel et au parc tertiaire des hypothèses de sobriété des surfaces, de rénovation performante, de sobriété d'usage et de dimensionnement et d'efficacité des équipements, et de remplacement des systèmes de chauffage en faveur d'options renouvelables. Le modèle fournit, dans le cadre d'une trajectoire générale de consommation et de production d'énergie, une trajectoire spécifique à 2050 et 2070, au pas annuel, par vecteur énergétique et par usage, de la consommation des bâtiments résidentiels et des bâtiments tertiaires.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Dans la nomenclature adoptée ici, le modèle peut être décrit comme un outil énergie de simulation exploratoire à visée normative, fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite l'ensemble du secteur du bâtiment à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050 partiellement prolongé à 2070, au pas annuel pour l'énergie et horaire pour l'électricité.



Champs et paramètres

Le modèle met en jeu les dimensions suivantes :

- **ressources** : la consommation d'énergie associée aux bâtiments, en lien avec des enjeux de production de cette énergie et d'impact de cette consommation (émissions de gaz à effet de serre) est l'enjeu central du modèle ;
- **bâtiments** : il prend en compte un modèle de stock des bâtiments, tenant compte des surfaces et des caractéristiques thermiques et constructives pour modéliser leur évolution et son impact sur la consommation d'énergie ;
- **équipements** : il s'appuie également sur un modèle de stock des équipements utilisés dans les bâtiments pour les différents usages pour intégrer des hypothèses sur l'évolution de leur nombre, de leur performance ou de leur usage ;
- **population** : le modèle porte moins sur cette dimension, essentiellement traitée sous l'angle de données d'entrée démographiques, mais endogénise toutefois des paramètres d'évolution comme le taux de cohabitation des ménages ou des effets différenciés comme pour le vieillissement.

Le modèle ne traite en revanche directement ni la dimension des **sols**, dans la mesure où il n'intègre pas de modélisation liée à la localisation des bâtiments et ne représente que leur surface de plancher (et pas leur empreinte au sol), ni la dimension de l'**économie** : celle-ci est traitée a posteriori sous l'angle d'une évaluation des coûts ou des emplois associés, qui peut en retour informer une évolution du scénario mais n'entre pas en tant que telle dans sa modélisation.

Enfin, un module complémentaire, qui n'a toutefois pas été utilisé pour le scénario 2021 mais qui avait été développé pour l'exercice précédent, permet de calculer selon une logique d'agrégation par branche des coûts d'investissement et d'exploitation associés à la trajectoire, et d'en déduire par l'application de ratios un contenu correspondant en emplois.



Chaînages et bouclages

Le modèle SnW est pour l'essentiel articulé avec deux modèles : négaMat, également développé par l'Association négaWatt, qui apporte une vision intégrée sur l'emprise en matériaux et en gaz à effet de serre, et le modèle Afterres, développé par Solagro, qui assure la cohérence entre les enjeux énergie, matériaux, l'agriculture et la forêt.

Le modèle n'est en l'état pas interfacé avec d'autres outils. Bien qu'il n'ait pas été construit dans cette optique, son caractère explicite et désagrégé permet d'en extraire des données relativement utilisables par d'autres modèles.



Questions et enjeux

Par rapport aux principaux questionnements identifiés, l'approche du modèle SnW se prête particulièrement bien à traiter certains enjeux associés à la **complétude technique**, notamment l'analyse en cycle de vie et les questions d'empreinte carbone (grâce au couplage avec négaMAT). Sa méthodologie est également propre à intégrer certaines thématiques liées aux **modes de vie**, en particulier sur la sobriété, bien sûr, et l'évolution des usages.

Il est à l'inverse peu adapté au traitement des enjeux des dynamiques économiques, même s'il permet de capter des évaluations en termes d'emploi et de précarité énergétique (via l'action de rénovation), qui pourraient être renforcées. Il ne permet pas, malgré son niveau de désagrégation, de capter des enjeux de dynamique territoriale mais peut être utile, croisé avec d'autres outils, pour intégrer des réflexions territoriales dans une cohérence nationale. Enfin, il reste pour l'essentiel construit sur une modélisation incrémentale qui ne permet pas, en l'état, de développer une quantification de la réponse aux crises (même s'il permet d'en interroger certains aspects au niveau qualitatif).

4.14. négaMAT (Association négaWatt)

L'outil négaMat, dont le développement par l'Association négaWatt a commencé en 2010-2011, apporte au modèle SnW sur l'énergie du scénario négaWatt le complément sur les matières premières. Comme MODEIRE, qui en est issu, il opère un découpage de l'économie française en segments et sous-segments, dont il quantifie les besoins en matériaux en entrée et en sortie, en fonction de leur niveau d'activité. Ces besoins, exprimés en tonnages et rapportés à une composition en matériaux primaires, permettent de quantifier, à partir des flux établis pour une année de référence, l'évolution des flux et des besoins primaires en matières premières associés à une trajectoire de transition énergétique à l'échelle de l'économie nationale. Ces besoins, grâce à une modélisation des imports et exports, sont rapportés à une empreinte en matières premières de l'économie.

Ces besoins étant rapportés aux différents secteurs, les quantités de matériaux mobilisées par la consommation d'équipements et de biens dans les bâtiments sont traitées mais par rapportées directement aux secteurs. Un volet consacré au secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) permet en revanche de quantifier directement les besoins de matériaux associés aux trajectoires de construction, de rénovation et réhabilitation, et de démolition.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Le modèle négaMAT est un outil de simulation exploratoire, techno-explicite et désagrégé de l'évolution de l'empreinte matière de l'ensemble de l'économie française, des résultats au pas annuel jusqu'à un horizon 2050.



Champs et paramètres

Traitant de l'ensemble de l'économie nationale plutôt que spécifiquement du bâtiment, il aborde essentiellement ce secteur sous trois angles : tout d'abord, en lien avec son objet premier, il se concentre sur la dimension des ressources, s'appuyant sur une unité fonctionnelle liée aux tonnages de matériaux ; il intègre ensuite celle des équipements, à travers l'ensemble de la production et des échanges ; enfin, il intègre fortement la dimension bâtiments, via des unités de construction, entretien, rénovation ou démolition appliquées à des métrés de différentes catégories de bâtiments.



Chainages et bouclages

Cet outil constitue, avec le modèle SnW qui est centré sur la consommation et la production d'énergie et le modèle Afterres, développé par Solagro sur l'agriculture et la forêt, une suite complète pour l'élaboration de scénarios énergie-matières à l'échelle nationale. Il n'est en l'état pas interfacé avec d'autres outils, mais est très proche, de par leur origine commune, d'un outil comme MODEIRE qui s'intègre dans la suite d'outils utilisés par l'ADEME. Plus généralement, son caractère explicite et désagrégé permet d'en extraire des données relativement utilisables par d'autres modèles.



Questions et enjeux

Comme son prolongement pour l'ADEME, MODEIRE, cet outil répond à l'origine à une volonté d'éclairer une question alors nouvelle sur l'empreinte matériau des trajectoires de transition énergétique. Il fournit à ce titre, via sa démarche de caractérisation physique des échanges et des modes de production, un support utile pour éclairer la question de l'empreinte en émissions de gaz à effet de serre de l'évolution de l'économie française. Au-delà de cet enjeu, il présente notamment l'intérêt, vis-à-vis de la complétude technique, de traiter au sein du même module les besoins associés au bâtiment et ceux associés aux infrastructures. Ensuite, bien qu'il ne porte pas sur la modélisation des modes de vie, il peut éclairer des enjeux de dynamiques sociétales liés à la sobriété, à l'économie circulaire ou à l'évolution des usages. Enfin, même s'il est fondé sur un mode de simulation continuiste, qui ne vise pas à représenter une situation de réponse aux crises, il fournit à minima une approche pour s'interroger sur la robustesse vis-à-vis du risque de tension ou de rupture d'approvisionnement sur des ressources.

4.15. Modèle artificialisation (CGDD)

Cet outil permet une simulation de l'évolution des surfaces artificialisées, partant d'un état des lieux de l'occupation des sols à l'échelle communale et jouant à l'échelle nationale sur quatre leviers liés à l'artificialisation par le parc bâti.

Le modèle est basé sur une désagrégation à l'échelle communale du stock de bâtiments, tenant compte à cette échelle de leur répartition par destination, de leur surface de plancher et de leur projection au sol par rapport à cette surface. Il applique ensuite à ce stock, de façon homogène et par itération incrémentale, des évolutions de ces paramètres indexées sur différents leviers favorables ou défavorables à l'artificialisation.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Il s'agit d'un outil bâtiment de simulation incrémentale, à visée prédictive ou exploratoire, de l'évolution de l'artificialisation liée au parc de bâtiments et d'infrastructures. Il est construit selon une approche explicite mixte-bottom-up pour la description du parc et top-down pour l'application des leviers sur l'artificialisation –, traitant l'ensemble de la France métropolitaine au pas annuel et à l'horizon que l'on souhaite.

Champs et paramètres

Le **modèle d'artificialisation** traite par nature spécifiquement de la dimension sols. C'est dans ce champ qu'il inscrit l'essentiel de sa modélisation, autour d'une unité fonctionnelle constituée de la surface de planchers et au sol de bâtiments à l'échelle communale, en lien donc avec la dimension **bâtiments**. La modélisation ne mobilise pas d'unités fonctionnelles dans d'autres dimensions mais intègre des évolutions s'y inscrivant : il s'agit en particulier des projections démographiques, qui portent à la fois sur la population et sur les emplois, avec les besoins en logements et en surfaces d'activité qui en découlent.

Chaînages et bouclages

Le modèle ne fait en l'état l'objet d'aucun chaînage ou bouclage direct avec d'autres outils, mais son utilisation dans le cadre de *Transition(s) 2050* a montré qu'il pouvait utiliser des orientations fournies par les modélisations du besoin en bâtiments basées sur les outils **ANTONIO** et **VIVALDI**. De par son caractère explicite, très désagrégié et incrémental, le modèle semble se prêter à une intégration plus poussée avec divers outils représentant, pour l'évaluation des besoins correspondants en énergie, en matériaux ou pour lui-même, l'évolution du parc bâti.

Questions et enjeux

Du point de vue des questionnements, il faut noter que le **modèle d'artificialisation** se situe, malgré son objet apparemment très spécifique, à l'interface de plusieurs facteurs prospectifs importants tels que l'évolution démographique, les enjeux d'occupation des bâtiments et l'urbanisme.

En termes de nouveaux questionnements, il porte bien sûr d'abord directement sur l'enjeu **technique** de l'usage des sols. Dans une moindre mesure, il peut dans le même registre informer la question du besoin d'infrastructures. Il peut également capter des enjeux relatifs aux **dynamiques sociétales**, notamment sur l'évolution des besoins et plus directement de répartition de la population et de densité, et dans une moindre mesure de **dynamiques territoriales**, en lien avec les développements possibles du modèle sur une différenciation des projections.

4.16. TiTAN (CGDD)

Le modèle TiTAN (trajectoires optimisées des technologies d'abattement pour la neutralité carbone) est un modèle technico-économique dédié à l'analyse socio-économique de la transition bas-carbone. Il a pour objet de proposer un modèle systémique intégrant l'ensemble des options disponibles pour décarboner l'économie et leur articulation et permettant d'en évaluer le coût, afin d'éclairer les choix d'investissement et de rendre compte des enjeux économiques correspondants.

C'est un modèle technico-économique multisectoriel. Il calcule, pour l'ensemble de l'économie qu'il décrit explicitement et de façon désagrégée, une fonction Objectif de minimisation des coûts pour répondre à une demande donnée dans une contrainte carbone donnée.

Le modèle couvre l'ensemble de l'économie. Le secteur bâtiment du modèle TiTAN recouvre l'ensemble du secteur résidentiel et du secteur tertiaire, qu'il divise en quatre « modes » : maison individuelle, habitat collectif, HLM et tertiaire.

Du point de vue de la cohérence, l'outil est particulièrement adapté à l'analyse des effets intersectoriels, ce qui permet d'interroger la répartition des « efforts marginaux » entre les différents secteurs et les différents leviers : par exemple, il permet de mesurer les implications pour les autres secteurs d'un effort moindre sur l'isolation des bâtiments, ou de discuter l'équilibre entre les efforts de sobriété et d'efficacité d'un côté et de décarbonation des vecteurs énergétiques de l'autre.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Il s'agit d'un outil plutôt orienté énergie – bien qu'il intègre d'autres éléments pour décrire l'évolution globale des émissions de GES – couvrant l'ensemble des secteurs économiques et plus spécifiquement le bâtiment (résidentiel et tertiaire), décrits sous l'angle technico-économique, et proposant une optimisation des coûts dans le respect d'un niveau donné de contrainte carbone.

Champs et paramètres

Le modèle, de par sa nature intersectorielle et interdimensionnelle, touche à l'ensemble des dimensions mobilisables pour une modélisation du secteur du bâtiment. Il se concentre toutefois, dans sa logique fondée sur la description des technologies, sur les dimensions relatives aux bâtiments, aux équipements et aux ressources, que viennent informer différents éléments s'inscrivant dans la dimension population (croissance et taille des ménages) ou la dimension économie (coûts, investissements...), qui reste par ailleurs celle où s'expriment in fine ses principaux résultats. Enfin, l'interaction avec le secteur des terres touche directement à la dimension sols.

Chaînages et bouclages

Par construction, le modèle TiTAN recherche une forme de complétude et d'auto-portance antagoniste de l'approche par chaînage et couplage de modèles plus spécialisés. Toutefois, son approche intersectorielle, sur le long terme et technico-explicite implique d'importantes simplifications, assumées par le modèle, qui appellent à travailler sa complémentarité avec les modèles existants plus fins sur chacun de ses secteurs, au premier rang desquels celui du bâtiment.

Questions et enjeux

L'outil TiTAN peut être relié à plusieurs nouveaux questionnements, même s'il n'est parfois pas évident d'imaginer la manière dont il pourrait y répondre davantage. En premier lieu, il touche de manière directe l'enjeu de l'arbitrage entre différents usages, inclus en matière d'usage des sols. Il peut également informer des enjeux relatifs à l'économie, autour de la question du budget des ménages par exemple, ou encore de profondeur de la sobriété et d'évolution des besoins.

4.17. IMACLIM-R (CIRED)

Issu d'un modèle éponyme développé à l'échelle mondiale dont il constitue une version recalibrée au périmètre de l'économie française, IMACLIM-R est un modèle d'équilibre général calculable fondé sur l'articulation entre un module de calcul d'équilibre macroéconomique statique de l'économie française, et des modules sectoriels économétriques dynamiques permettant de modéliser l'évolution des secteurs concernés sous l'effet du progrès technique et de différents signaux économiques traduisant de façon directe ou indirecte des politiques et mesures liées à la décarbonation et à la transition énergétique. Conçu dès l'origine pour tester des trajectoires de transition ou des politiques et mesures s'y rapportant, il repose sur une description sectorielle attachée à refléter les évolutions de la production et de la consommation d'énergie, dans des modules plus ou moins détaillés. Si le secteur tertiaire n'y est pas très détaillé, le secteur résidentiel fait au contraire l'objet d'un développement particulier, au point d'aboutir à un module externalisable sous la forme Res-IRF. L'outil permet ainsi à la fois de calculer des trajectoires de consommation d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'évaluer leur impact au plan macroéconomique.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Le modèle IMACLIM-R est une version calibrée pour la France d'un modèle d'équilibre général calculable fondé sur une double approche de calcul d'équilibre économique top-down et de description explicite d'évolutions sectorielles en bottom-up, permettant d'évaluer les impacts macroéconomiques à l'échelle nationale de politiques ou de trajectoires de transition énergétique, à l'horizon 2050 au pas annuel.

Champs et paramètres

L'essentiel de l'effort de modélisation de cet outil porte sur la dimension de l'économie, où il traite à la fois de coûts, de prix de l'énergie et de différents équipements, de valeur des biens immobiliers et d'emplois. Il intègre également, via ses modules sectoriels, des éléments descriptifs se rapportant aux bâtiments, aux équipements qui y sont utilisés et aux ressources énergétiques qu'ils consomment. Enfin, il comporte un module spécifiquement consacré à la population, qui n'est toutefois considérée que comme un ensemble, et représentée via une unité fonctionnelle correspondant au ménage représentatif comme agent économique.



Chaînages et bouclages

Cet outil est conçu comme un outil intégré, qui n'a pas besoin de chaînage avec d'autres éléments pour opérer. La manière dont il est construit autour de modules sectoriels dynamiques interagissant dans le calcul récursif avec un modèle d'équilibre général statique, permet de considérer spécifiquement les possibilités de couplage avec d'autres outils des premiers, dans la mesure où ces modules sont suffisamment désagrégés ou technico-explicites. À l'inverse, comme le montre l'exemple de Res-IRF, des modules sectoriels développés dans IMACLIM-R peuvent être externalisés pour être chaînés avec d'autres modèles.



Questions et enjeux

Même s'il n'a pas été spécifiquement développé pour répondre à des questions nouvelles, l'outil IMACLIM-R présente différents aspects intéressants par rapport aux questions et enjeux identifiés dans le cadre de l'étude.

Tout d'abord, même si l'approche désagrégée et explicite de ses modules sectoriels n'interdit pas des ouvertures vers les sujets de complétude technique, c'est évidemment du côté des **dynamiques socio-économiques** que des points d'appui peuvent être envisagés. Ce modèle semble en effet se prêter à explorer davantage des sujets relatifs à la dimension financière, et à l'articulation entre les prix, les conditions de financement et la valeur du patrimoine immobilier ; il traite déjà la question du poids de l'immobilier dans le budget des ménages mais pourrait peut-être, moyennant des renforcements sur les catégories de ménages à prendre en compte comme agents économiques, aller davantage sur la question des inégalités.

Il présente par ailleurs, du point de vue des **dynamiques sociétales**, l'intérêt de prendre en compte un indicateur de budget temps, tout en représentant l'économie marchande et l'économie non marchande, ce qui devrait permettre d'explorer davantage les enjeux de rapport au travail et au temps.

Enfin, sous l'angle de la **réponse aux crises**, sa méthode de modélisation est a priori conçue pour envisager la réponse à un choc de prix ou de politique publique. Il est donc apte à envisager des situations de ce type, sous réserve cependant en l'état qu'elles puissent être traduites dans des termes appréciables par le modèle (c'est-à-dire sous forme de prix) et qui ne soient pas suffisamment disruptifs pour remettre en cause le cadre de long terme sur lequel repose le calcul d'équilibre du modèle.

4.18. Res-IRF (CIRED / ENPC)

Le modèle Res-IRF permet une simulation de l'évolution du stock de logements et de sa consommation d'énergie en fonction du comportement des acteurs face aux politiques mises en place en matière notamment de rénovation thermique. Res-IRF contribue à l'évaluation des politiques publiques et alimente les travaux de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) et de la stratégie française énergie et climat (SFEC) sur le secteur résidentiel. Par ailleurs, Res-IRF sert également de module résidentiel au modèle IMACLIM-R France.

La force de l'outil est une décomposition fine des acteurs économiques et une approche économique et sociologique de leur prise de décision notamment en termes de rénovation, tenant compte des obstacles à la décision que constituent le dilemme entre propriétaire et occupant, la prise de décision en logement collectif, les dimensions non-énergétiques de la décision de rénovation, ou encore l'effet rebond.

Parmi les pistes de développement envisagées, figurent : le rebouclage entre les coûts de construction / rénovation et le rythme d'activité, la différenciation entre un parcours par gestes et la rénovation complète et performante, la prise en compte des consommations de climatisation et les interactions (antagonistes ou synergiques) entre confort d'été et confort d'hiver, le lien avec les marchés immobiliers, pour évaluer l'impact notamment des interdictions de mise en location des passoires thermiques et le lien avec les marchés de la rénovation, afin d'évaluer l'impact d'un choc de demande (induit par une hausse des subventions, ou une nouvelle interdiction, etc.)

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Le modèle Res-IRF est un modèle de simulation exploratoire d'énergie visant à fournir une aide à la décision sur les politiques et mesures relatives en particulier à la rénovation thermique des logements. Il traite l'ensemble des consommations d'énergie du secteur résidentiel avec un focus sur les politiques publiques relatives à la rénovation thermique, et permet des projections à l'horizon de son choix au pas de calcul incrémental annuel ou pluriannuel.



Champs et paramètres

Cet outil s'appuie avant tout sur une approche descriptive en stock de la dimension bâtiments, avec une unité fonctionnelle de nombre de logements par catégorie, en fonction du type de logement et de son niveau de performance énergétique. Cette dimension est liée à celle des usages, et de la quantification des consommations d'énergie, le chauffage étant toutefois le seul usage spécifiquement modélisé. Il porte enfin sur la dimension des

personnes, qui ne font cependant pas l'objet d'une modélisation mais sont traités sous forme d'agents réagissant à différents signaux dans la dimension économique, inclus les effets des politiques publiques.



Chaînages et bouclages

Bien que ces aspects n'aient pas été explorés en détail, l'outil Res-IRF s'intègre dans deux logiques de modélisation et de construction de trajectoires plus larges. La première concerne la suite de modèles utilisée par la DGEC pour la construction de trajectoires énergie-climat, pour laquelle il fournit une information sur les politiques et stratégies de rénovation ; la seconde porte sur son utilisation comme module relatif au secteur résidentiel dans le modèle plus large Imaclim-R.



Questions et enjeux

De par son périmètre volontairement spécifique, cet outil se prête assez peu à un élargissement du questionnement. Il présente toutefois l'avantage de relier, sous l'angle des préférences d'acteurs (propriétaires ou occupants), des enjeux relatifs aux usages, aux signaux économiques et aux politiques publiques, et peut notamment à ce titre se prêter à une exploration plus approfondie de certains enjeux relatifs aux **dynamiques socio-économiques**, dont il traite déjà certains aspects tels que l'effet « rebond » ou la précarité. Il semble en revanche plus difficile de le relier aux autres enjeux identifiés.

4.19. BTPFlux (CSTB / ADEME)

Cet outil modélise de façon détaillée les consommations de matières premières et les flux de déchets générés à l'échelle du parc de bâtiments en fonction de scénarios de construction, démolition et rénovation.

Il s'agit d'un outil d'analyse des flux matières (material flows analysis, ou MFA) reposant sur une approche de description bottom-up du parc existant basée sur des archétypes constitués de macro-composants et de caractérisation technique bâtiment par bâtiment. Le champ couvert est celui de la consommation de matériaux associés au cycle de vie des bâtiments, tous types de bâtiments et tous types d'action de construction, déconstruction ou rénovation confondus.

La principale force du modèle est sa connexion à la BDNB, riche de plus de 21 millions de bâtiments résidentiels ou tertiaires, qui permet une meilleure caractérisation des bâtiments et une bonne connaissance du parc pour l'échantillonnage et sa pondération. Elle est au cœur de l'approche mixte, entre modélisation « bottom-up » par archétypes et modélisation « au bâtiment » qui fait l'originalité de BTPFlux.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Le modèle BTPFlux est un outil de diagnostic des consommations de matériaux et des flux de déchets à l'échelle du parc de bâtiments d'un territoire, sans visée normative ou prospective. Il couvre l'ensemble du territoire métropolitain mais s'applique plutôt, pour des raisons d'opérabilité du calcul, à l'échelle de territoires plus restreints.



Champs et paramètres

Les deux dimensions principales sur lesquelles opère le modèle sont celles des bâtiments et celle des ressources. Sur la première, le modèle procède en combinant deux unités fonctionnelles : celle du bâtiment lui-même, individualisé, et celle du cluster, ou de l'archétype, représentant une catégorie de bâtiments à l'intérieur du parc. Sur la seconde, le modèle traite principalement des quantités de matériaux et de déchets mis en jeu. La démarche de modélisation peut conduire à toucher d'autres dimensions, telles que celle des sols autour de la géométrie des bâtiments ou celle de l'économie autour des coûts de traitement des déchets, mais de façon très secondaire.



Chaînages et bouclages

Cette dimension n'a pas été explorée. Le modèle BTPFlux fait partie d'une suite d'outils développés par le CSTB et s'inscrit de fait dans une démarche de modélisation globale de différents enjeux associés au bâtiment (les composants Typy sont notamment décrits par une donnée environnementale donc « chainables » avec un calcul ACV). Si son caractère très descriptif et son mode de calcul se prêtent assez bien à des démarches d'interfaçage avec d'autres outils, le niveau détaillé d'information auquel il travaille et l'articulation de ses données avec celles de la BDNB constituent à l'inverse des limitations importantes à l'interfaçage avec des outils travaillant à un niveau plus agrégé.



Questions et enjeux

Bien qu'il n'ait pas une vocation prospective, et qu'il soit limité dans ce domaine dans la mesure où son fonctionnement est adossé à la caractérisation et à l'évaluation du parc de bâtiments existant, cet outil aborde différentes problématiques proches des questionnements identifiés. Cela concerne bien sûr essentiellement la **dimension technique**, avec des évaluations très directement connectées par exemple à l'analyse en cycle de vie. Au-delà de cet

enjeu, le modèle s'approche par sa méthode de la question de l'empreinte écologique, et pourrait probablement par exemple traiter davantage de la problématique d'artificialisation des sols. Dans un autre registre, la capacité du modèle à travailler à différentes échelles se prête sans doute à éclairer sous l'angle de la trajectoire matériaux et déchets, dans la dimension territoriale, des enjeux de différenciation par territoire ou d'articulation du local au national.

4.20. Décarbo-CSTB (CSTB)

La démarche portée par cet outil vise à la modélisation de l'impact carbone en cycle de vie du secteur du bâtiment et à la quantification, en cycle de vie également, de leviers de décarbonation. L'objectif de l'outil est de combiner une modélisation de type diagnostic sur le contenu en carbone du parc de bâtiments et de son utilisation avec la capacité à projeter l'impact de stratégies visant à la décarbonation.

L'outil porte sur l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre associées à la vie du parc de bâtiments, tant du point de vue de leur cycle de vie incluant leur construction, leur éventuelle rénovation et leur démolition, que du point de vue de la consommation d'énergie générée par leur usage.

L'outil n'est pas stabilisé. Les travaux en cours combinent une approche top-down et une approche bottom-up. L'approche top-down, basée sur une thèse récente, s'appuie sur la base de données Exiobase pour estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur du bâtiment en cycle de vie et en empreinte, c'est-à-dire en distinguant la part territoriale et la part liée au solde entre exportations et importations. Les émissions du scope 1 et 2 sont basées sur les données du CEREN, et les émissions du scope 3 sont tirées des données d'Exiobase. L'approche bottom-up s'appuie sur une démarche de modélisation conforme à celle développée pour [BTPFlux](#).

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

La démarche Décarbo-CSTB porte sur une modélisation exploratoire, à visée normative, de la décarbonation du secteur du bâtiment, à l'échelle nationale ou infra, aux horizons de temps souhaités, du point de vue de l'amélioration des performances énergétiques par la rénovation comme du contenu carbone en analyse cycle de vie des matériaux utilisés en construction et en rénovation.



Champs et paramètres

Le modèle traite essentiellement deux dimensions, qui sont celles des **bâtiments**, avec leurs composants constructifs, et celle des **ressources (énergie)**. Concernant la première, il utilise à la fois l'unité fonctionnelle du bâtiment, qui est celle de la BDNB, et celle de l'archétype représentatif d'une catégorie de bâtiments, tel que développé dans TyPy. Pour la seconde, il mobilise à la fois des unités relatives à l'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre, à chaque fois sous l'angle des unités de comptage mises en jeu.



Chaînages et bouclages

Dans la démarche globale de modélisation développée par le CSTB, l'outil [Décarbo-CSTB](#) peut s'articuler avec d'autres outils. En particulier, il s'appuie sur des éléments partagés avec le modèle [BTPFlux](#) (la base BDNB, le module TyPy et le module géométrique). Il peut également être chaîné avec d'autres outils pour lui fournir par exemple certaines des données exogènes dont il a besoin, par exemple avec [ZEPHYR](#) sur les hypothèses de construction ou de rénovation.



Questions et enjeux

Au regard de son périmètre, cet outil aborde différentes problématiques proches des questionnements identifiés. Cela concerne pour l'essentiel la **dimension technique**, avec une méthode d'évaluation explicitement liée à une analyse en cycle de vie, et une capacité de caractérisation, sur une partie de son périmètre au moins, de l'empreinte en émissions de gaz à effet de serre des bâtiments. Le modèle s'approche plus largement par sa méthode de la question de l'empreinte écologique, et pourrait peut-être traiter d'autres aspects constitutifs de cette empreinte. Il semble en revanche peu apte à s'ouvrir à d'autres enjeux parmi ceux que cette étude met en évidence.

4.21. MENFIS (CSTB / ADEME)

Le Modèle Énergie et FIScalité (MENFIS) porte sur la projection de l'évolution de la consommation d'énergie via la modélisation de la probabilité des ménages de réaliser des travaux de rénovation sur le parc résidentiel selon les politiques publiques.

Il s'agit d'un modèle hybride énergie-économie de simulation de trajectoires de performance énergétique et de consommation de chauffage des logements, explicite sur les techniques et les comportements. Ce modèle projette une évolution de la performance énergétique du parc résidentiel français à l'horizon du court-moyen terme, via la combinaison d'actions de rénovation, d'effets de vétusté, et de démolitions et

constructions. Il développe des calculs technico-économiques pour déterminer les parts de logements rénovés et le niveau de performance atteint, et en déduire les niveaux de consommation d'énergie.

L'outil **MENFIS** est organisé autour d'un modèle microéconomique comportemental basé sur la maximisation de l'utilité de l'investissement en matière d'investissement dans la rénovation. Il permet de modéliser la probabilité de réalisation de gestes ou bouquets de gestes de rénovation par les ménages selon les politiques publiques (subventions...) croisées avec des hypothèses d'évolution des prix de l'énergie.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Le modèle **MENFIS** est un outil de simulation technico-économique, explicite sur les caractéristiques techniques du parc de logements et les comportements de ses occupants vis-à-vis de la rénovation énergétique, destiné à fournir une aide à la décision sur l'efficience des politiques et mesures dans ce domaine. Il fournit une évaluation de leur effet à l'échelle nationale, au pas de temps annuel, et jusqu'à un horizon suffisamment qualifié par ses hypothèses de cadrage.

Champs et paramètres

Cet outil se concentre sur la dimension du **parc de bâtiments**, auquel il applique essentiellement des actions de rénovation (inclus le changement de mode de chauffage), qu'il décrit sous la forme d'unités fonctionnelles appelées segments, correspondant à des catégories de logements selon sept variables relatives à leur type et aux caractéristiques de leurs propriétaires ou occupants. Il traite aussi fortement la dimension **économie**, au travers des prix des énergies et des différents signaux économiques encadrant les coûts directs et indirects de la rénovation. Pour faire le lien entre ces deux dimensions, il aborde celle des ressources, au sens des consommations d'énergie pour l'usage chauffage, et celle de la population, caractérisée sous forme de cohortes de ménages de différentes catégories.

Chaînages et bouclages

La question des chaînages et bouclages n'a pas été véritablement explorée. Cet outil s'intègre dans la démarche globale de modélisation développée par le CSTB, et fournit des éléments qui participent de l'élaboration des stratégies nationales en matière d'énergie, de climat et de bâtiment. Un chainage avec le modèle macroéconomique de l'ADEME ThreeMe est prévu afin de fournir des données de calibration à ce dernier.

Questions et enjeux

De par son périmètre volontairement spécifique, cet outil se prête assez peu à un élargissement du questionnement. Il s'intéresse toutefois à une problématique relative aux réponses des ménages aux signaux relatifs à la rénovation qui ouvre sur certains des enjeux identifiés autour des dynamiques socio-économiques, comme l'effet « rebond », dont il traite déjà, ou les questions de distribution des efforts et des bénéfices de l'action en matière de rénovation, en lien avec les enjeux de revenus comme de précarité. Au-delà de ces points particuliers, il semble plus difficile de le relier aux autres enjeux identifiés.

4.22.ZEPHYR (CSTB)

Ce modèle permet de modéliser, à l'échelle d'un parc résidentiel, l'optimisation économique des trajectoires de rénovation thermique du point de vue de la minimisation du coût global associé au chauffage.

ZEPHYR est un outil de simulation prospective dit « énergie-économie » en ce qu'il croise ces deux dimensions, basé sur une approche technico-économique et centré sur la minimisation du coût global de chauffage d'un grand nombre de logements-types, représentatifs et permettant une reconstitution dite « bottom-up » du parc résidentiel français.

L'approche consiste à modéliser l'ensemble des consommations d'énergie pour le chauffage d'un parc résidentiel, à calculer leur coût et à simuler la meilleure trajectoire de réduction de ce coût, en fonction d'actions de rénovation et de changement de système de chauffage.

Le principal point fort de cet outil réside dans sa fonction spécifique, qui permet d'informer, pour un parc résidentiel donné, la trajectoire d'optimisation économique de la stratégie de rénovation. Sa robustesse repose par ailleurs sur le fait de construire cette modélisation sur la base d'un échantillon de 35 000 logements-types.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

L'outil **ZEPHYR** est un outil de simulation prospective techniquement et économiquement explicite, qui propose en fonction d'hypothèses sur les signaux économiques (prix de l'énergie, politiques publiques) une trajectoire de minimisation du coût global associé au chauffage des logements. Il s'appuie sur une modélisation bottom-up, fondée sur un grand nombre de logements types, dont il projette l'évolution en termes de performance thermique et d'usage du parc français, au pas annuel jusqu'à un horizon 2050 ou autre.

Champs et paramètres

Le modèle s'intéresse principalement à la dimension des **usages**, dans laquelle il représente la consommation d'énergie associée au chauffage des bâtiments, et à celle de l'**économie**, dans laquelle il représente les différents coûts associés à cet usage, c'est-à-dire les factures énergétiques des ménages et les coûts d'investissement dans la rénovation thermique ou les modes de chauffage. Pour représenter cette relation, l'outil s'appuie sur une modélisation de l'évolution du stock de **bâtiments**, centrée sur le résidentiel et procédant par une quantification de surfaces de logements de différents types, auxquels sont associés des caractéristiques constructives ainsi que des éléments touchant à d'autres dimensions, comme les ménages ou la compacité, donc l'empreinte au sol.

Chaînages et bouclages

Comme pour les autres outils spécifiquement évoqués par le CSTB, **ZEPHYR** s'intègre dans une démarche globale de modélisation et peut intervenir dans l'élaboration de stratégies à l'échelle nationale comme à une échelle plus locale, mais la question des chaînages et bouclages dans lesquels il s'inscrit ou pourrait s'inscrire n'a pas été précisément discutée. La construction spécifique autour de logements-types sur laquelle il repose réduit probablement les capacités d'interface avec des modèles n'opérant pas selon la même logique, mais la nature désagrégée et explicite de sa description technique peut au contraire se prêter à l'interfaçage.

Questions et enjeux

À l'inverse d'une démarche d'élargissement du questionnement, cet outil est construit pour répondre de façon opérationnelle à un questionnement précis concernant l'optimisation économique des trajectoires de rénovation des logements, en coût d'investissement et d'usage. Toutefois, la manière très désagrégée et explicite dont il modélise la relation entre le parc de bâtiments, l'évolution de leur enveloppe et leur usage pourrait se prêter à des évolutions permettant de capter d'autres enjeux. Parmi ceux-ci, sans préjuger de l'utilité de tels développements en regard d'autres options disponibles, on peut notamment identifier les questions sociales liées à la distribution des revenus et des dépenses et la précarité, les évolutions en termes d'usage, dont la sobriété sur les usages ou sur les surfaces, ou encore la différenciation territoriale et l'articulation des échelles du local au national. Il semble en revanche plus difficile de le relier aux autres enjeux identifiés.

4.23. Suite de modèles sectoriels (DGEC)

L'appellation **Suite de modèles sectoriels** désigne ici les différents outils développés en interne ou mobilisés à l'externe dans une suite permettant à la DGEC de modéliser des trajectoires de consommation d'énergie et d'émissions associées pour le secteur du bâtiment, dans le cadre notamment de l'élaboration de trajectoires globales alimentant la Stratégie nationale bas carbone (SNBC). Cette suite d'outils, qui combinent différentes approches et sont pour certains communs avec d'autres exercices – comme le modèle **MICO** qui fournit des données d'entrée –, construit globalement une capacité de modélisation qui couvre l'ensemble du secteur résidentiel et du secteur tertiaire et permet, via des outils et modèles portant sur des enjeux plus transversaux, d'approcher différents enjeux, notamment économiques, associés à ces trajectoires. Celles-ci sont globalement caractérisées au pas annuel et projetées à un horizon 2050 (sans que celui-ci corresponde toutefois à une limite des modèles).

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Sous l'appellation de suite de modèles sectoriels se cache en fait une suite complexe d'outils mobilisés pour établir, par agrégation de trajectoires portant sur des segments du parc bâti et/ou sur des usages spécifiques et croisement avec des modèles plus transverses, une projection des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre du résidentiel-tertiaire inscrite dans une modélisation complète de l'économie et compatible avec des objectifs généraux de politique énergétique et climatique au niveau national. Cette suite est basée sur des modèles technico-explicites de simulation incrémentale, ouverte, des consommations énergie, reposant soit sur une description désagrégée physique de l'évolution du système, soit sur une part de simulation de comportements d'agents pilotée par les prix ou les politiques publiques. L'ensemble comprend également, pour l'évaluation de différents enjeux transversaux, des modélisations de type entrée-sortie ou macro-économique.



Champs et paramètres

La modélisation intègre et articule différents champs, de manière parfois complexe.

En premier lieu, en cohérence avec la volonté de simuler des projections de consommation d'énergie dans les bâtiments selon une logique « bottom-up » et physiquement explicite, la suite mobilisée couvre prioritairement les trois dimensions directement liées à cette analyse :

- la dimension des **bâtiments**, décrite respectivement sous forme de nombre de logements, avec leur surface moyenne, et de surface d'activité par branche pour le tertiaire, auxquels sont attachés des caractéristiques telles que leur performance énergétique ;
- celle des **équipements**, qui comprend les systèmes de chauffage, d'eau chaude sanitaire et de climatisation, caractérisés en termes de nombre et de performance, et les autres équipements, plutôt décrits par leur efficacité et leur consommation moyenne, l'ensemble étant croisé avec les vecteurs énergétiques utilisés ;
- enfin, celle des **ressources**, qui comprend d'abord, dans les outils de construction de la trajectoire, les consommations d'énergie réparties par vecteur – et les calculs d'émissions de gaz à effet de serre associées – mais intègre également, dans l'analyse transversale, l'empreinte en matériaux.

Au-delà, cette modélisation intègre bien sûr la dimension **population**, même si celle-ci intervient plutôt comme donnée d'entrée du calcul des surfaces que dans la modélisation elle-même, le nombre d'habitants, traduit en nombre de ménages répartis dans les catégories de logements ou d'actifs répartis par branche, n'étant qu'une donnée d'entrée du calcul de surfaces. La suite d'outils touche également à la dimension des **coûts**, via des calculs agrégés en investissements comme des calculs macro-économiques, qui retombent également sur le nombre d'emplois. Enfin, un module traite partiellement, via un calcul d'artificialisation, de la dimension des **sols**.



Chaînages et bouclages

Cette suite combine le recours à des modèles développés par d'autres acteurs et des outils propres à l'opérateur DGEC. À l'exception de quelques éléments, comme l'articulation entre les données démographiques fournies par **Omphale** et leur entrée dans les modèles sur les usages, elle comprend toutefois peu de chaînages opérationnels, et encore moins de bouclages.

Elle obéit davantage à une logique de juxtaposition et de croisements de différents outils. Ainsi, la juxtaposition obéit au besoin d'utiliser différents outils existants (**Res-IRF**, **Vivaldi**, **MICO...**), complétés par quelques modules ad hoc, pour couvrir l'ensemble des segments bâti-matériaux du résidentiel et du tertiaire et l'ensemble des usages de l'énergie dans ces bâtiments. Le croisement correspond à la volonté de vérifier la cohérence de la trajectoire ainsi reconstituée avec différents objectifs et enjeux sur les émissions de gaz à effet de serre, la consommation de matériaux ou encore les coûts.

Plus largement, il faut souligner également que cette suite, en elle-même complexe, s'inscrit dans un ensemble de modélisation plus large, où d'autres modèles sectoriels, eux-mêmes plus ou moins construits par agrégation de différents outils, sont mobilisés pour construire une trajectoire globale.



Questions et enjeux

La suite d'outils composant ce modèle sectoriel est construite pour répondre à une finalité précise d'élaboration de la SNBC. De par la richesse de ces outils, elle peut s'ouvrir à différents questionnements identifiés comme peu ou mal couverts, mais la complexité de son architecture et l'hétérogénéité des outils et la difficulté à faire évoluer leur articulation rend l'intégration de nouvelles problématiques peu évidente.

La suite aborde déjà plusieurs des questionnements relatifs à la **complétude technique**, comme l'empreinte en matériaux ou l'usage des sols, et pourrait être renforcée dans une perspective d'analyse en cycle de vie. Elle pourrait également progresser sur la couverture du parc bâti. De la même manière, elle traite déjà via certains de ses outils des enjeux relatifs aux **dynamiques socio-économiques**, qu'il s'agisse de la réponse aux mécanismes de prix ou, dans sa dimension transversale, de l'évaluation en emplois, et pourrait élargir son champ pour approfondir certains sujets.

Elle pourrait également, dans une moindre mesure, s'ouvrir par une vision plus prospective à des aspects liés aux dynamiques sociétales, qu'elle aborde peu, en particulier lorsqu'ils peuvent être approchés par une modélisation bottom-up explicite, comme les nouveaux usages ou l'adaptation climatique. Elle semble en revanche moins adaptée pour répondre aux questionnements sur les **dynamiques territoriales**, et encore moins sur la **réponse aux crises**.

4.24. Mésange (DG Trésor / INSEE)

Mésange est un modèle d'équilibre général macro-économétrique appliqué à l'économie nationale, qui tient un rôle de référence pour l'évaluation ex ante de l'impact macroéconomique de politiques et mesures économiques par l'administration française. Il n'est pas spécifiquement conçu pour évaluer des politiques et mesures se rapportant à la transition énergétique et/ou au secteur du bâtiment, d'autant qu'il obéit à une approche de type top-down ne portant pas de description explicite des objets physiques mis en jeu, qu'il s'agisse des bâtiments ou des consommations d'énergie. Il reflète toutefois dans sa modélisation des éléments tels que le poids de l'immobilier dans l'investissement des entreprises, et plus encore des ménages, et traite dans sa dernière version, actualisée en 2017, la production et la consommation d'énergie comme un secteur à part entière.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Mésange est un modèle d'équilibre général macro-économétrique visant notamment à permettre la simulation des effets macro-économiques de politiques publiques, à l'échelle de l'économie française.



Champs et paramètres

L'approche strictement macro-économétrique de cet outil implique que, même s'il intègre par nature l'ensemble des dimensions, il ne les représente de façon explicite que dans la dimension économie. Dans ce cadre, il travaille notamment de manière explicite, en lien avec d'autres dimensions comme la population ou les bâtiments, sur des éléments tels que les ménages représentatifs, ou sur l'immobilier comme composante importante de l'investissement des entreprises et des ménages.



Chaînages et bouclages

Ce modèle est par nature un outil bouclé, non chaîné à d'autres modèles. Il se prête toutefois, pour certaines analyses dont les termes ne peuvent pas être directement traduits dans ceux de ses calculs d'équilibre, à un chaînage avec des maquettes dédiées, c'est-à-dire des modules ad hoc externalisés permettant de produire les données d'entrée dont il a besoin.



Questions et enjeux

De par son caractère volontairement macro, appliqué à l'ensemble de l'économie, cet outil se prête peu à l'exploration de questionnements relatifs au secteur du bâtiment et de l'immobilier. En l'absence ou presque d'éléments descriptifs spécifiques, il reste loin de sujets relatifs par exemple à la complétude technique ou aux dynamiques territoriales ; à l'inverse, sur des thématiques qu'il aborde plus ou moins directement, comme les dynamiques socio-économiques ou la réponse aux crises, avec la possibilité de modéliser notamment des chocs de prix (sous réserve qu'ils ne remettent pas en cause le cadre économique de long terme dans lequel s'inscrit Mésange), l'outil n'est pas conçu pour identifier spécifiquement des impacts liés au secteur du bâtiment. Il intègre toutefois des éléments permettant peut-être d'aller un peu plus loin sur ces questions, comme l'évaluation spécifique de l'immobilier dans l'investissement.

4.25.OTELO (DHUP / Cerema)

Le modèle OTELO permet une projection des besoins de logements à l'échelle d'un territoire donné, en fonction de l'état du parc et des hypothèses démographiques. Il s'agit d'un outil de simulation exploratoire, techno-explicite et descriptif des besoins de logement à l'échelle de bassins d'habitat.

Le modèle présente une double finalité :

- au niveau national, OTELO contribue aux travaux de prospective énergétique de l'État (PPE, SNBC, SFEC etc.), en établissant le besoin en logements.
- au niveau territorial, OTELO est un outil mis à disposition d'un certain nombre d'acteurs, dont les collectivités territoriales pour leur PLH, SCoT, PLUi etc.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

OTELO est un modèle techno-explicite de simulation des besoins de logement en fonction d'hypothèses démographiques et d'objectifs en matière d'occupation, à l'échelle territoriale des bassins d'habitat, sur un horizon de temps pouvant s'étendre jusqu'à 2050.



Champs et paramètres

Le modèle n'intervient que sur deux dimensions du champ considéré, en travaillant directement sur la relation entre la dimension bâtiments et la dimension population. Sur la première, il se concentre sur le parc résidentiel et choisit comme unité fonctionnelle celle du logement, en incluant l'ensemble des leviers susceptibles d'affecter leur nombre. Sur la seconde, il considère la population sous forme de ménages, reliant cette unité au nombre d'individus par un facteur de cohabitation.



Chaînages et bouclages

Cet outil s'inscrit par nature dans des démarches de construction de trajectoires et de planification à l'échelle des territoires, ou par extension au niveau national, dans lesquelles il apporte une brique importante mais pas nécessairement suffisante. Il a, à ce titre, vocation à être combiné avec d'autres outils dans les exercices de projection dans lesquels il intervient. Toutefois, cette articulation semble n'intervenir qu'au cas par cas, et de manière artisanale, plutôt que via un travail de chaînage au niveau des outils. La nature désagrégée, descriptive et explicite de cet outil

devrait pourtant permettre davantage d'interfaçage technique, à condition toutefois d'accéder, pour une utilisation nationale, à sa version consolidée à cette échelle.

Questions et enjeux

Le périmètre de cet outil est limité par rapport à l'ensemble des facteurs prospectifs et des questionnements identifiés, mais il présente un potentiel intéressant. En premier lieu, il se prête de par sa construction à une ouverture, du point de vue des scénarios, aux réflexions sociétales relatives à l'évolution de la population et de ses besoins. Ensuite, il permet bien sûr, là encore par construction, d'intégrer aux réflexions prospectives une différenciation de ces besoins selon les territoires, tout en couvrant la situation de territoires spécifiques, y compris par son extension aux DROM. Enfin, il pourrait jouer un rôle important, en regard de la problématique d'adaptation au changement climatique, dans la construction de projections tenant compte de l'impact de cette question sur la répartition de la population sur le territoire national.

4.26. Modèle demande électrique (EDF)

Ce modèle vise à projeter, dans le cadre d'analyses portant sur le système électrique et son bon fonctionnement, une évolution à long terme se voulant réaliste de l'ensemble de la demande d'énergie (électricité et autres vecteurs : gaz, pétrole, chaleur, biomasse, charbon, hydrogène). Il s'agit d'un ensemble d'outils de simulation par agrégation de l'évolution de la demande d'énergie par usage de l'énergie, combinant une approche bottom-up et une approche macro (cadrage démographique et macro-économique). Les deux modules considérés, l'un consacré au résidentiel et l'autre au tertiaire, s'intègrent dans une suite à usage interne développée par EDF pour modéliser les consommations futures d'électricité dans une perspective d'équilibre du système électrique.

Le module résidentiel est un modèle simplifié mais qui s'appuie sur des modèles plus détaillés (4 000 logements) permettant la modélisation fine pour la puissance (modèle physique avec inertie et zonage). La modélisation intègre l'ensemble des consommations d'énergie des bâtiments résidentiels, avec la répartition entre vecteur énergétique. Projétés en énergie, puis traduits en puissance.

Le module tertiaire couvre l'ensemble du parc tertiaire. L'outil intègre toutes les consommations d'énergie, par vecteur énergétique (décomposition en 7 usages hors éclairage public, traité comme une branche à part).

Des modèles spécifiques existent pour la Corse et pour les DROM, pour prendre en compte les spécificités de ces territoires tant du point de vue de la nature de systèmes électriques insulaires que du climat ou des usages.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Ce modèle est un support à la scénarisation de l'évolution de la demande d'énergie. Il est fondé sur une description explicite des consommations d'énergie en général, et plus spécifiquement d'électricité, inscrite dans une démarche d'agrégation bottom-up mais intégrant des éléments de rebouclage top-down. Il traite l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires sur le périmètre national, au pas annuel pour l'énergie et au pas horaire pour les consommations d'électricité en puissance.

Champs et paramètres

À l'image de la plupart des modèles dédiés à la projection de consommations d'énergie du bâtiment et construits selon une logique de représentation désaggrégée et explicite de ces consommations, le modèle d'EDF opère essentiellement sur les trois dimensions nécessaires à cette analyse : celle des **bâtiments**, avec une description concrète sur la base de cohortes de logements types pour le résidentiel et de surfaces de catégories de bâtiments tertiaires ; celle des **équipements**, intégrant par exemple les systèmes de chauffage et de climatisation et l'ensemble des appareils consommateurs d'énergie ; enfin celle des **occupants et de leurs comportements**.

Chaînages et bouclages

Cet aspect n'a pas été spécifiquement exploré. EDF dispose autour de l'enjeu majeur que constitue pour elle la projection de la demande électrique de nombreux outils, plus ou moins intégrés ou chaînés. Le modèle décrit ici est lui-même un outil intégrateur de différents sous-modèles, eux-mêmes plus ou moins connectés à d'autres.

Questions et enjeux

Le modèle de demande électrique développé par EDF n'a pas été interrogé sous l'angle prospectif, son utilisation semblant en l'état plutôt tournée vers une visée plus opérationnelle. EDF souligne que les modèles sont bâties pour soutenir la production de scénarios, que leur caractère « prévisionniste » ou « prospectif » découle de ce fait directement des narratifs des scénarios et des corps d'hypothèses retenus, et qu'il est possible de les utiliser dans le

cadre d'exercices normatifs, visant par exemple la neutralité carbone (en émissions directes). L'approche de modélisation développée par EDF avec cet outil présente en tous cas différents aspects intéressants : ainsi, sa volonté d'inscrire l'évaluation de la consommation des différents segments du parc bâti dans une quantification globale et bouclée se rapproche des questions relatives à la complétude du parc, et son approche très désagréée fait écho aux enjeux identifiés sur la modélisation de l'évolution des usages ou la prise en compte d'une typologie détaillée des logements et surfaces tertiaires différenciée selon les territoires.

4.27.Modèle demande électrique (Enedis)

L'outil, développé au sein de la Direction de la stratégie d'Enedis, est destiné à éclairer les enjeux spécifiques de l'évolution du réseau de distribution électrique dans la perspective de la transition énergétique, pour capter des dynamiques locales et ainsi identifier des zones susceptibles de nécessiter des renforcements et adaptation du réseau de distribution d'électricité sur le périmètre Enedis (95% du territoire français continental). Il s'agit d'un modèle de simulation principalement technico-explicite de l'évolution de la consommation d'énergie visant à projeter l'évolution de la courbe de charge électrique.

L'outil est développé et utilisé par la Direction de la stratégie pour les besoins internes d'Enedis.

Pour le résidentiel, le modèle couvre l'ensemble du parc, décrit à une maille locale assez fine, en constituant des ensembles de logements / bâtiments présentant des caractéristiques identiques. Pour le tertiaire, il couvre l'ensemble des branches, décrites via un raisonnement en surface rapporté au niveau d'activité. L'objectif des modules bâtiments, en lien avec les autres parties du modèle globale, est de constituer des courbes de charge locales pour la consommation électrique des bâtiments afin de projeter l'évolution de ces courbes selon différentes hypothèses de transition énergétique.

L'une des spécificités de ce modèle est de pouvoir croiser à la maille locale les enjeux d'évolution du bâtiment et de ses usages avec le développement du photovoltaïque (PV).

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Ce modèle d'Enedis est un outil orienté énergie de simulation exploratoire à visée prospective, fondé sur une description bottom-up et explicite des consommations d'énergie. Il traite dans ce cadre global l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires sur le périmètre national, à l'échelle du réseau de distribution d'électricité, au pas annuel pour l'énergie et au pas horaire pour les courbes de charge électrique.

Champs et paramètres

Comme l'essentiel des modèles centrés sur la question énergétique et construits selon une logique bottom-up explicite, l'outil prospectif de modélisation de la demande d'Enedis, appliqué aux secteurs résidentiel et tertiaire travaille pour l'essentiel sur les trois dimensions indispensables à cette analyse, c'est-à-dire celle des **bâtiments**, des **équipements** et des **ressources**. Sur la première, il couvre le parc résidentiel avec la spécificité d'utiliser comme unité fonctionnelle une logique de « clustérisation » des bâtiments à la maille opérationnelle du réseau de distribution. Sur la troisième, il se concentre sur la consommation d'énergie et plus spécifiquement de la courbe de charge qui en résulte pour la demande électrique.

Pour le modèle tertiaire, la modélisation est plus hybride : elle est en partie économétrique et top-down pour l'évolution du parc, et en partie technico-explicite, pour l'évolution de la consommation unitaire des usages.

Le modèle intègre dans une moindre mesure les autres dimensions, qu'il s'agisse de données d'entrées ou de paramètres de cadrage relatifs aux dimensions économique et démographique, ou des enjeux liés à l'occupation des sols via les effets d'inertie thermique qui peuvent en résulter.

Chaînages et bouclages

Cette question n'a pas été explorée, dans la mesure où il s'agit d'un outil purement interne. Le modèle est sans doute articulé à d'autres outils également développés pour ses propres besoins par Enedis, ou éventuellement externes, mais cela relève de problématiques relatives au réseau de distribution électrique et à son bon fonctionnement, hors du champ de la présente analyse.

Questions et enjeux

Bien qu'il soit construit pour répondre à des besoins assez spécifiques et opérationnels, le modèle se prête bien, par son approche, à une exploration de certains questionnements identifiés dans cette étude. Dans le champ de la **complétude technique**, il aborde par exemple indirectement la question des usages des sols, et traite directement, avec le réseau de distribution électrique, d'une partie du besoin en infrastructures.

Il présente également des liens intéressants avec les questionnements relevant des dynamiques sociétales. Cela peut concerner la question des nouveaux usages, ou des questions d'évolution des besoins ou d'impact d'une plus ou moins grande densification. Dans le même esprit, il peut éclairer dans le champ des dynamiques territoriales la question d'une

différenciation liée au climat ; il peut surtout informer, sous l'angle qui est le sien, la réflexion sur la cohérence des évolutions entre les niveaux local et national.

4.28.MOSAIC (Enedis / Mines Paris)

L'outil MOSAIC est un simulateur de la courbe de charge associée à la demande électrique, tourné vers la gestion de la sécurité électrique et l'information des stratégies d'évolution du réseau de distribution d'électricité. Il repose sur une approche de type « bottom-up » explicite et poussée pour modéliser de façon fine l'évolution de cette consommation, inclus une modélisation spécifique de cette évolution pour le parc de bâtiments. Le modèle s'applique à une année, et fournit un résultat au pas horaire ou 10 minutes. Il n'est pas appliqué à un territoire prédéterminé, et peut couvrir tout territoire en France, jusqu'au niveau national, voire être appliqué à un territoire à l'étranger.

L'un des atouts de MOSAIC est son caractère intrinsèquement modulaire, qui permet une grande flexibilité d'usage et une grande variété des hypothèses testées. Il permet notamment de jouer sur le niveau d'agrégation et sur le pas de temps pour s'adapter à différents besoins. L'outil ne fournit pas de trajectoire, mais permet à l'inverse des analyses de sensibilité. Il est assez facile de comparer assez différents « tirs », c'est-à-dire mesurer l'écart lié à une certaine variation de performance, de taux de transfert, d'usage, de conditions climatiques ou autre sur la courbe de charge. Une autre force est la calibration sur l'ensemble des courbes HTA qui permet, à l'échelle de quelques milliers de bâtiment, d'avoir une certaine confiance dans la forme de la courbe.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Il s'agit d'un outil énergie de simulation exploratoire à visée prédictive ou prospective, reposant sur une désagrégation bottom-up et explicite allant jusqu'à la description unitaire de chaque dispositif physique de consommation, pour projeter sur une année la courbe de charge électrique d'un ensemble défini de bâtiments résidentiels et tertiaires.

Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle de l'outil est le logement (dans le résidentiel) ou l'unité tertiaire.

Chaînages et bouclages

Cette dimension n'a pas été explorée s'agissant de cet outil, qui porte un traitement original du bâtiment mais est délibérément tourné vers la gestion opérationnelle du système électrique. À ce titre, il fait potentiellement l'objet de chaînages ou de bouclages avec d'autres outils dont dispose Enedis, mais ne semble pas connecté à d'autres outils applicables au secteur du bâtiment et de l'immobilier, et n'a en tous cas pas été conçu pour ça. Cependant, la calibration réalisée à partir des données de départ HTA permet d'assurer un bouclage à ces échelles.

4.29.EnerMED (Enerdata)

EnerMED est le modèle développé en propre par Enerdata à partir du modèle MedPRO, et constitue la dernière version des modèles de la famille MEDEE, destinés à produire des trajectoires de demande d'énergie et d'émissions de GES associées pour évaluer l'impact de différentes actions. Cet outil porte sur l'ensemble de la consommation d'énergie, tous secteurs confondus, et sur la trajectoire d'émissions de GES associée. Il est composé de plusieurs modules sectoriels (industrie, transports, résidentiel, tertiaire, agriculture), et un module macro pour le cadrage démographique et macro-économique.

L'outil EnerMED peut être vu comme un générateur de modèles : il n'est pas calé sur la situation française et peut être appliquée dans différents pays ou sur différents territoires en fonction des données de calibration qui lui sont fournies, avec un degré de désagrégation plus ou moins fin et paramétrable.

La spécificité du modèle est d'être flexible sur les catégories et sur le niveau de désagrégation retenus. Pour le résidentiel, l'unité fonctionnelle est le logement. Le modèle peut intégrer jusqu'à 10 types de logements et 10 classes de performance énergétique. Pour le tertiaire, l'unité fonctionnelle est le m² de plancher de bâtiment tertiaire. Le modèle peut prendre en compte jusqu'à 10 sous-secteurs afin de différencier les évolutions, en leur appliquant comme pour le résidentiel une transformation matricielle à chaque étape de simulation. L'originalité du modèle EnerMED est d'être flexible, c'est-à-dire de pouvoir être appliqué, sur la base d'une même structure, à différentes typologies et à différents niveaux de désagrégation des secteurs, dont le bâtiment, afin de s'adapter aux besoins des utilisateurs ou aux contraintes de disponibilité de données.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Il s'agit d'un outil énergie de simulation exploratoire à visée prospective, permettant une description bottom-up, explicite et flexible de l'ensemble des consommations d'énergie, inclus le résidentiel et le tertiaire. Il couvre tous les usages et s'applique à tout territoire de niveau national ou régional, avec un pas de temps d'un à dix ans et un horizon ouvert, fixé par défaut à 2050.

Champs et paramètres

Le modèle fait pour l'essentiel porter son effort descriptif, centré sur la représentation technique, sur les trois niveaux matériels associés à la consommation d'énergie des bâtiments :

- le stock de **bâtiments** lui-même, avec respectivement le logement et l'unité de surface de plancher tertiaire comme principales unités fonctionnelles ;
- le niveau des **équipements**, où il n'utilise pas un modèle de stock (à part pour le chauffage) mais s'appuie sur une description du taux, de la technologie et des performances des équipements d'une part, et de leurs conditions d'utilisation d'autre part ;
- la dimension des **ressources**, où il s'intéresse pour l'essentiel à l'énergie consommée, et calcule avec des hypothèses sur le mix énergétique les émissions de GES.

L'outil intègre également pour son cadrage des éléments relatifs aux dimensions population et économie, mais ne développe pas de description spécifique dans ces dimensions.

Chaînages et bouclages

Le modèle **EnerMED** vise plutôt une utilisation autoportante dans le cadre d'un service fourni aux utilisateurs, et n'est à ce titre pas conçu comme un élément d'une chaîne d'outils. Il se prête toutefois, pour une modélisation plus spécifique des enjeux liés à la demande électrique, à un chaînage avec un modèle de courbes de charge développé par Enerdata.

L'outil peut également être connecté, grâce à son approche bottom-up explicite et à sa flexibilité en termes de désagrégation, avec des macro-modèles tels que **ThreeME** pour des calculs d'investissements ou d'emplois par exemple.

Questions et enjeux

Très centré sur les enjeux énergie / CO₂ qui ont dominé l'évolution de la prospective du secteur bâtiment depuis de nombreuses années.

On peut toutefois le rapprocher directement, par son parti pris singulier de travailler en énergie utile, de l'enjeu de bonne représentation de la sobriété, et par extension d'un questionnement sur l'évolution des besoins. De par sa capacité à quantifier la part respective des différents leviers dans les différents secteurs, il peut contribuer à éclairer la question des arbitrages entre usages.

Sa modélisation simple se prête également à une approche sur la sensibilité des trajectoires aux évolutions de la population.

Enfin, même s'il n'est pas spécifiquement destiné à cet usage, on peut noter que le caractère ouvert des choix de paramétrage pourrait rendre cet outil utile pour approcher, avec un découpage en catégories et un niveau de détail des données adaptés, la modélisation de trajectoires pour les territoires d'outre-mer.

4.30.Enerter (Énergies Demain)

Enerter désigne une suite de plusieurs modules constituant un outil cartographique permettant, sur la base d'une reconstitution du parc bâti résidentiel et tertiaire, de modéliser finement la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle d'un territoire, tout en intégrant quelques enjeux économiques et sociaux comme le traitement de la mobilité. Le modèle produit, selon des logiques différentes, une évaluation des consommations d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre pour le parc résidentiel d'une part, et tertiaire d'autre part, pour une année, selon les hypothèses que l'on projette.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

La suite de modules **Enerter** compose un modèle de simulation statique de la consommation d'énergie du parc de bâtiments, au périmètre d'un territoire partout en France métropolitaine. La modélisation procède par reconstitution des consommations à partir d'une caractérisation explicite à la maille IRIS, avec une démarche bottom-up croisant une description physique et socio-économique pour le résidentiel, et une démarche de d'agrégation de la donnée cadastrale vers une échelle IRIS, par branche pour le tertiaire.



Champs et paramètres

Cet outil se concentre naturellement sur la dimension **bâtiments**, dont il décrit les unités sous forme de surfaces répondant à différents types en fonction de leurs modes constructifs et architecturaux. Il investit également la dimension des **équipements**, avec plus ou moins de détail explicite sur le nombre, le type et la performance selon qu'il traite des systèmes de chauffage, d'eau chaude sanitaire ou d'équipements diffus, dans le résidentiel ou le tertiaire. Il couvre par continuité, au niveau des **ressources**, les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre qui leur sont associées. Il ne développe en revanche de description explicite ni dans la dimension **population** ni dans la dimension **économie**, même si la première entre pleinement dans la modélisation via des indicateurs sur le nombre de ménages ou d'actifs par branche tertiaire, quand la seconde est abordée via des questions de prix de l'énergie, de revenus en lien avec les enjeux de précarité, ou encore de volume d'activité dans le tertiaire.



Chaînages et bouclages

En tant qu'outil, **Enerter** est lui-même constitué par l'articulation de plusieurs modules couvrant les différents volets de son champ d'application, mais forme un modèle autonome. Conçu pour fonctionner comme outil de diagnostic, il peut également fournir l'état des lieux initial nécessaire à une évaluation prospective : c'est ainsi qu'il est chaîné avec l'outil **Prosper**, qui propose à la même maille territoriale une simulation dynamique de l'évolution des consommations d'énergie et enjeux associés.



Questions et enjeux

En tant qu'outil de simulation statique, ce modèle n'a pas vocation a priori à intégrer des enjeux prospectifs. Toutefois, il pourrait favoriser l'intégration de certains d'entre eux à l'étape du diagnostic, de par sa construction à la maille locale. Cela est déjà le cas sur la précarité et la prise en compte des écarts de revenu, dans le champ des dynamiques **socio-économiques**. La logique de modélisation à laquelle il obéit semble par exemple ouverte à une prise en compte de quelques enjeux relatifs à la **complétude technique**, comme l'usage des sols, et la maille à laquelle il s'applique peut s'articuler avec les enjeux de différenciation territoriale, mais il semble limité dans ce domaine, et encore moins à même d'intégrer des enjeux se rapportant aux dynamiques sociétales ou à la réponse aux crises.

4.31. Outil cadastral (Énergies Demain)

Cette appellation désigne en fait différents modules opérés par Énergies Demain pour produire des simulations statiques des consommations d'énergie des bâtiments sur un territoire donné, dans des conditions projetées, en tenant compte à l'échelle cadastrale d'éléments constructifs et relatifs à l'empreinte physique des bâtiments.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Cet outil est un modèle de simulation statique de la consommation d'énergie des bâtiments, au périmètre d'un parc bâti, pouvant s'appliquer à des bâtiments résidentiels et tertiaires partout en France métropolitaine. La modélisation procède par reconstitution des consommations à partir d'une caractérisation explicite des bâtiments à l'adresse et d'un calcul normalisé du profil énergétique tenant compte des caractéristiques physiques et d'occupation.



Champs et paramètres

Cet outil se concentre naturellement sur la dimension **bâtiments**, dont il décrit les unités sous forme de volumes attachés à une adresse, eux-mêmes divisés lorsqu'ils connaissent plusieurs occupants en sous-volumes répartis entre les différents usagers. Le modèle relie cette dimension à celle des **ressources** en calculant pour chaque unité ainsi constituée une consommation d'énergie, qui ne passe toutefois pas par une modélisation explicite au niveau des **équipements**.

Il ne décrit par ailleurs que de façon sommaire la population, approchée sous forme de catégories et nombres d'occupants, et n'aborde pas explicitement la dimension économie. Enfin, il intègre des données de caractérisation s'inscrivant dans la dimension des sols, avec l'empreinte en surface de chaque bâtiment considéré, mais ne l'exploite pas en tant que telle dans la modélisation.



Chaînages et bouclages

La démarche décrite sous l'appellation **socle cadastral** est une démarche de diagnostic, fournissant aux gestionnaires de parc bâti un état initial. Elle est en ce sens auto-portante. Elle fournit toutefois aussi le support nécessaire pour une éventuelle projection dynamique de l'évolution du parc, mais celle-ci est opérée à la carte, et ne fait pas l'objet d'une démarche standard via un outil qui serait directement chaîné avec cette simulation statique.



Questions et enjeux

En tant qu'outil de simulation statique, ce modèle n'a pas vocation a priori à intégrer des enjeux prospectifs. Son périmètre très local d'application en restreint également la portée sous cet angle. Il peut néanmoins permettre

d'intégrer de façon fine, à l'étape du diagnostic, certaines préoccupations pour favoriser leur prise en compte dans une étape prospective. Cela pourrait notamment être le cas dans le registre de la **complétude technique** : il pourrait par exemple, par son approche à l'adresse, améliorer la complétude du parc bâti couvert, ou encore, grâce aux données qu'il engrange sur la surface au sol des bâtiments, favoriser la prise en compte des usages des sols; en renforçant son approche des réseaux d'énergie, il pourrait également être utile sur les enjeux d'optimisation locale ou de besoins d'infrastructures. Enfin, dans un autre registre, sa maille très fine pourrait aussi permettre une caractérisation à cette échelle du parc vis-à-vis des enjeux d'adaptation.

4.32. Prosper (Énergies Demain)

Cet outil fournit une prospective énergétique territoriale, applicable à la maille des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) mais agréable à une échelle territoriale plus importante. Il couvre l'ensemble des consommations d'énergies, incluses celles des secteurs résidentiels et tertiaires, et permet de simuler des trajectoires en fonction de combinaisons d'actions se rapportant à la transition, avec des résultats au pas de 10 ans entre 2030 et 2050.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

L'outil **Prosper Actions** propose une simulation dynamique exploratoire de l'évolution de la consommation d'énergie d'un parc de bâtiments, au périmètre d'un territoire intercommunal ou plus large, partout en France métropolitaine. Il repose sur une reconstitution explicite, bottom-up de la consommation d'énergie par usage des bâtiments résidentiels et tertiaires, construite à partir de la simulation statique fournie par **Enerter** et agrégée en moyenne communale. La projection procède par l'application d'actions prédéfinies par rapport à un scénario « tendanciel » représentatif des mesures existantes.



Champs et paramètres

Cet outil se concentre naturellement sur la dimension **bâtiments**, dont il décrit les unités sous forme de surfaces répondant à différentes catégories selon leurs caractéristiques physiques et d'occupation. Il traite également la dimension des **équipements**, avec plus ou moins de détail explicite sur le nombre, le type et la performance selon qu'il s'agit de chauffage, d'eau chaude sanitaire ou d'équipements diffus, et du résidentiel ou du tertiaire. Il remonte ainsi, au niveau des **ressources**, les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre qui leur sont associées. Il ne développe en revanche de description explicite ni dans la dimension **population** ni dans la dimension **économie**, même si la première entre pleinement dans la modélisation via des indicateurs sur le nombre de ménages ou d'actifs par branche tertiaire.



Chaînages et bouclages

L'outil **Prosper Actions** est conçu pour s'articuler avec **Enerter**, afin d'enchaîner, au même périmètre, une simulation statique fournissant le diagnostic, ou l'état des lieux, et une projection dynamique permettant de se comparer à un état final attendu, exprimé sous forme d'objectifs à atteindre.



Questions et enjeux

Par son approche de modélisation, cet outil semble notamment ouvert à différents enjeux prospectifs nouveaux, moyennant le cas échéant quelques renforcements. C'est notamment le cas dans le domaine de la **complétude technique**, s'agissant par exemple des usages des sols ou des besoins en infrastructures – une caractérisation vis-à-vis des réseaux étant déjà embarquée.

Par ailleurs, une des particularités de **Prosper Actions** est de permettre l'agrégation à différentes échelles emboîtées des trajectoires construites, de l'échelle de base, communale, à l'application préférentielle, intercommunale, puis par regroupement de ces trajectoires jusqu'au niveau départemental voire régional. Cette approche peut répondre à des enjeux relatifs aux **dynamiques territoriales**, qu'il s'agisse non seulement de cette cohérence inter-échelles mais aussi d'enjeux de différenciation des évolutions.

4.33. Outil Perspectives gaz (GRDF)

L'outil a été développé par GRDF dans le cadre de l'exercice commun de prévision et de prospective de GRDF, Terga et GRTgaz sur les Perspectives gaz (également mené en coordination avec les autres gestionnaires de réseau, Teréga et Gaz & Territoires).

C'est un modèle de simulation, avec une description bottom-up et physique des changements et de leurs impacts. Il agrège pour la partie bâtiment deux modèles distincts, sur le résidentiel et le tertiaire, et travaille à partir de paramètres annuels pour sortir une consommation d'énergie. Le module résidentiel couvre le parc résidentiel, avec une description du parc distinguant maisons individuelles et logements collectifs, et tenant compte pour ces derniers d'un système de chauffage collectif ou individuel. Le modèle travaille à partir d'un stock de bâtiments, qu'il fait évoluer et auquel il associe des

consommations. Le module tertiaire l'ensemble du tertiaire, découpé en branches d'activité (bureaux, cafés et restaurants, commerces, enseignement et recherche, sports, transports...), qu'il peut décrire à l'échelle nationale ou à l'échelle des régions administratives.

De par son objectif, le modèle est intrinsèquement descriptif, techno-explicite et fortement paramétrable, ce qui se prête naturellement à différentes analyses de sensibilité, y compris sur des paramètres impactants tels que des hypothèses de recohabitation dans le résidentiel, ou d'évolution sectorielle plus différenciée dans le tertiaire.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Il s'agit d'un outil énergie de simulation exploratoire à visée prévisionnelle et prospective, fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite le résidentiel et le tertiaire et couvre tous les usages de l'énergie susceptibles d'être couverts par le gaz à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France continentale, à un horizon 2050, au pas annuel.



Champs et paramètres

Compte-tenu de ses objectifs et de son mode de construction bottom-up et techno-explicite, le modèle se concentre naturellement sur les trois dimensions physiques constitutives de la formation de la demande en énergie : celle du **bâtiment**, avec une description du stock de logements et du stock de surfaces tertiaires par les deux modèles correspondants, celle des **équipements** avec une description du stock sur un certain nombre de systèmes et des caractères liés aux performances et aux usages, et celle des **ressources** avec le calcul des consommations d'énergies, elles-mêmes rapprochées dans la modélisation globale des fournitures correspondantes.

L'outil n'ouvre pratiquement aucune modélisation dans la dimension **population**, qu'il ne prend en compte que sous l'angle d'une projection démographique globale, à l'exception du paramètre lié au taux de cohabitation qu'il modélise, ni dans la dimension **économie**, qu'il ne touche qu'à travers l'évolution en nombre d'emplois du secteur tertiaire. Enfin, compte-tenu de son caractère national et de l'absence de description de la surface au sol des bâtiments, cet outil n'aborde pas la dimension **sol**.



Chaînages et bouclages

Cet aspect n'a pas particulièrement été analysé. Dans la mesure où il est développé comme un outil autonome répondant à un besoin opérationnel déterminé, le modèle d'élaboration des trajectoires pour *Perspectives gaz* n'est pas relié par conception à d'autres outils. Il peut toutefois l'être avec des outils internes développés en complément par ses porteurs pour ses besoins spécifiques, comme le modèle de charge électrique permettant d'évaluer les impacts de la demande sur le besoin de production en pointe.



Questions et enjeux

Sans doute en lien avec son objet relativement spécifique et non centré sur le bâtiment, cet outil présente peu de liens avec les questionnements nouveaux ou importants mis en évidence dans cette étude. Il s'inscrit néanmoins clairement, de par l'enjeu des transferts ou non d'usages sur son périmètre de modélisation, dans la problématique de l'arbitrage entre usages. Même s'il n'est pas conçu dans cette optique, il peut également, par son mode de construction des trajectoires, éclairer directement des questions telles que l'évolution des besoins ou la sensibilité des équilibres du système à des variations sur la projection démographique.

4.34.Omphale (INSEE)

Cet outil fournit des projections de référence pour l'évolution de la population française, pouvant servir de base à différentes modélisations. Le modèle Omphale permet de réaliser des projections de population sur des zonages infra nationaux composés d'ensemble de communes (adjacentes et si la population concernée est supérieure à 50 000 habitants), ainsi que des projections dérivées (ex : nombre d'élèves, personnes âgées dépendantes, ménages). Il couvre la France entière, outre-mer compris. Éléments de discussion. Omphale est « le » modèle de référence des projections démographiques territoriales. Il dispose d'une grande finesse dans la granulométrie (tranches d'âge et territorialisation).

Le modèle actuel est Omphale 2022. Il succède aux modèles Omphale 2010 et Omphale 2017.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Omphale est un outil de projection par simulation descriptive de l'évolution de la population, construit sur la base des statistiques démographiques nationales et fondé sur une segmentation fine de la population, y compris du point de vue territorial.



Champs et paramètres

Le modèle ne traite par construction que de la dimension **population**, qu'il traite à la fois comme un ensemble d'individus et de regroupement par ménages. Par ailleurs, sans développer explicitement la dimension des **sols**, dans la mesure où il ne représente pas les bâtiments qu'occupe la population ni donc leur implantation, le modèle prend en compte, via les migrations et la segmentation par unités de population, la dimension territoriale.



Chaînages et bouclages

L'outil **Omphale** propose des trajectoires démographiques à l'échelle de la population française, qui correspondent aux besoins en données d'entrée de nombreux exercices. Un chaînage est notamment opéré, dans le champ des modèles portés par des acteurs institutionnels, avec le modèle de simulation des besoins de logement **OTELO**, afin de projeter les besoins à l'échelle des territoires. Sans que les chaînages soient organisés du point de vue de l'interfaçage, les projections fournies par **Omphale** servent de façon repérée de données d'entrée pour de nombreux modèles considérés dans l'étude.



Questions et enjeux

Le caractère unidimensionnel de cet outil, puisqu'il ne travaille que sur la dimension population, et son champ relativement normatif de projection de fourchettes possibles d'évolution de la population selon des combinaisons d'hypothèses hautes ou basses limitent son potentiel vis-à-vis des questionnements prospectifs identifiés. Il semble toutefois pertinent d'envisager une utilisation plus prospective pour explorer, dans le **champ sociétal**, un spectre plus large d'évolution de la population.

Cet outil fournit également une piste privilégiée pour construire, à l'appui de préoccupations au croisement de l'impact des changements d'environnement et de la question **territoriale** de différenciation des trajectoires, des projections relatives à l'impact possible du changement climatique sur la répartition de la population sur le territoire national.

4.35. ECLORE (Institut négaWatt)

ECLORE, nouvel outil développé par l'**Institut négaWatt**, est un modèle de gestion prospective des emplois et compétences permettant d'identifier les trajectoires de transition professionnelle, de recrutement et de formation nécessaires à la mobilisation des emplois et compétences pour la mise en œuvre de stratégies de rénovation performante du parc bâti permettant d'atteindre l'objectif fixé en moyenne nationale au niveau BBC pour la France à 2050. Il permet de calculer des trajectoires lissées de mobilisation des actions de rénovation, qu'il rapproche de besoins en emplois et compétences, et peut s'appliquer, selon le degré de précision recherché, du niveau intercommunal au niveau national.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

ECLORE est un modèle de simulation normative et explicite de trajectoires de rénovation thermique du parc de bâtiments et d'emplois correspondants, intégrant dans son application une part d'optimisation dans le lissage des besoins, qu'il calcule au pas annuel à l'horizon 2050. Il peut s'appliquer avec une granulométrie adaptée à des calculs depuis l'échelle nationale de la France métropolitaine jusqu'à celle de l'intercommunalité.



Champs et paramètres

Cet outil travaille essentiellement, si ce n'est uniquement, sur les deux dimensions qu'il vise spécifiquement à relier : celle des **bâtiments**, qu'il décrit sous forme d'unités de logements pour le résidentiel et de surfaces pour le tertiaire, et des gestes de rénovation qui s'appliquent à eux, et celle de l'**économie**, avec l'ensemble des emplois associés, qu'il décrit en termes de nombre de postes dans les entreprises et de personnes suivant des formations.



Chaînages et bouclages

La conception d'**ECLORE** a jusqu'ici porté sur l'élaboration d'un modèle auto-portant, suffisamment explicite et désagrégé pour fonctionner de manière autonome. Sa structure bottom-up et son caractère ouvert se prêtent toutefois assez bien à des interfaçages potentiels, tant du point de vue de son articulation avec d'autres modes de simulation de trajectoires sur le bâtiment qu'en termes d'utilisation directe de ses résultats dans d'autres exercices.



Questions et enjeux

Ce nouvel outil vise clairement à explorer l'un des sujets identifiés comme questions et enjeux dans le champ des **dynamiques socio-économiques**, relatif à celle des emplois et des compétences. Il l'aborde à la fois sous l'angle de l'évolution des métiers, et des transitions professionnelles, et sous celui de la disponibilité des compétences nécessaires à la transformation du parc. Au-delà de cette question, sa construction permet d'envisager, par sa capacité d'application à différentes échelles, des liens avec l'enjeu **sociétal** d'une évolution de la répartition de la population, et du point de vue **territorial** avec les questions de cohérence entre les différentes mailles de territoire.

4.36. Planiss'Immo (Institut négaWatt)

Plus qu'un outil, Planiss'Immo désigne une démarche d'accompagnement de gestionnaires dans la trajectoire de transition énergétique et bas carbone de leur parc bâti à l'horizon 2050. Celle-ci intègre un outil de modélisation qui propose un exercice classique de simulation de la consommation d'énergie de ce parc bâti, au pas annuel, permettant de planifier et de piloter une stratégie d'amélioration de sa performance énergétique.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

L'outil Planiss'Immo propose une simulation ouverte, techno-explicite, de la consommation d'énergie applicable à un parc bâti, utilisée dans le cadre d'un accompagnement de gestionnaires de parc sur leur stratégie de planification de l'amélioration des performances énergétiques. Il s'applique aux parcs tertiaires et permet de calculer des trajectoires de consommation d'énergie et des besoins en investissements correspondants.

Champs et paramètres

Le modèle travaille principalement dans trois des dimensions. Il porte avant tout sur la **dimension bâtiments**, approchée par des unités de surface d'activité tertiaire et par des leviers de construction et de rénovation, et dans la dimension **ressources**, où il se concentre sur la consommation d'énergie mais considère aussi, en lien avec des hypothèses touchant aux **équipements** et aux substitutions d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre associées. Il fait également un lien avec la dimension de l'**économie**, en rapprochant les actions relatives aux bâtiments de coûts d'investissement et de capacités financières.

Chaînages et bouclages

Bien que son approche de simulation ouverte et son caractère explicite et désagrégé se prêtent assez bien à être interfacé en entrée ou en sortie avec d'autres outils, l'outil Planiss'Immo est conçu pour fonctionner de manière autonome, dans le cadre d'une utilisation directe par les acteurs auprès desquels cette démarche d'accompagnement est déployée.

Questions et enjeux

Cet outil, conçu pour être le support d'une démarche d'évaluation et de planification à l'échelle du gestionnaire d'un parc bâti, se prête peu à l'exploration des questions et enjeux identifiés à l'échelle de la prospective nationale. Il peut toutefois, en imaginant que sa souplesse d'utilisation offre la possibilité d'introduire au cas par cas de nouvelles dimensions, être relié à des enjeux d'application ponctuelle comme l'optimisation locale ou l'articulation entre le local et les échelles plus grandes.

4.37. Building Model (Mines Paris)

Il s'agit d'un modèle de simulation des consommations d'énergie des bâtiments qui cherche à s'appuyer au mieux sur les bases de données existantes pour informer la planification énergétique à l'échelle locale, voire nationale. Il combine pour cela un volet de traitement statistique des données, permettant à partir de différentes bases de données et de méthodes d'inférence de caractériser le parc à l'échelle du bâtiment sur le territoire objet de la modélisation, et un volet de calcul des consommations d'énergie permettant une simulation.

L'outil BuildingModel s'inscrit dans une approche de cartographie exhaustive du parc de bâtiments, par contraste avec une approche de cartographie par archétype, représentée par exemple par le modèle ZEPHYR. La spécificité de l'outil Building Model et de proposer une approche hybride par rapport aux deux principaux types de modèles de simulation énergétique existants : les modèles d'ingénierie, basés sur des modélisations physiques, et les modèles statistiques, basés sur des régressions statistiques. L'approche hybride consiste à prendre en compte des changements physiques tout en s'appuyant sur des bases de données.

Cela permet d'intégrer, tout en restant au plus près de la réalité statistique, des éléments plus ou moins complexes de modélisation de phénomènes physiques à considérer, comme les qualités de l'enveloppe des bâtiments, le comportement plus ou moins détaillé des systèmes de chauffage, l'ensemble des transferts aérauliques (modélisation dynamique en pression et température, transfert entre zones), les effets liés à l'apport naturel en éclairage, le niveau d'occupation...

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Outil de modélisation de la consommation d'énergie pour les secteurs résidentiel et tertiaire permettant de projeter la consommation sur une année donnée, pour des territoires infranationaux, sur une logique bottom-up.

Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle du modèle est le bâtiment. Le modèle documente également l'emprise au sol du bâti. Les données de sortie sont la consommation énergétique.

Chaînages et bouclages

BuildingModel est lié au modèle **SHAPE Optim**, qui permet d'optimiser les stratégies de rénovation. Il peut donc d'ores et déjà fonctionner en écosystème. Il a également été utilisé pour analyser les renforcements du réseau de distribution pour l'intégration du PV, dans le cas du projet RaccoFlex. Il est actuellement utilisé pour la même question sur le véhicule électrique dans le cadre du projet PlaneTerr et de la thèse de Yoann Chiche.

Questions et enjeux

Le caractère infranational du modèle pourrait lui permettre de documenter des enjeux de dynamiques territoriales différencierées.

4.38. SHAPE-Optim (Mines Paris)

L'outil SHAPE-Optim vise à proposer une aide à la décision pour la rénovation énergétique territoriale, en développant une capacité de générer des plans d'actions optimisés à une maille bâtiment, sur la base d'une modélisation fiable tenant compte des consommations énergétiques des bâtiments, des systèmes de chauffage et des options de rénovation thermique, en s'appuyant essentiellement sur des données d'observation accessibles aux territoires.

Le modèle cherche, par son approche hybride, à réaliser un compromis entre précision et simplicité. Il vise une description exhaustive du parc permettant de représenter son hétérogénéité et de considérer des contraintes locales, tout en permettant à l'opérateur d'ajuster le niveau de détail, d'action et de contrainte. Une originalité du modèle réside dans la latitude proposée à l'utilisateur dans la formulation finale du problème d'optimisation. Celle-ci permet une résolution rapide en grande dimension et son évaluation selon plusieurs indicateurs. Elle permet également d'intégrer facilement de nouveaux leviers, ou de réaliser des variantes autour de la formulation de base.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Outil de modélisation de la consommation d'énergie pour les secteurs résidentiel permettant d'optimiser une trajectoire de rénovation, dans une logique bottom-up.

Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle du modèle est le logement.

Chaînages et bouclages

SHAPE Optim est lié au modèle **BuildingModel**, qui permet de documenter la consommation d'énergie du parc de bâtiment. Il peut donc d'ores et déjà fonctionner en écosystème.

Questions et enjeux

La finalité d'optimisation du modèle peut être mise à profit pour documenter les arbitrages entre les multiples objectifs de la transition (économiques, émissions GES, gestion de la pointe électrique...).

4.39. ThreeME (OFCE / ADEME / NOE)

ThreeME est un modèle d'équilibre général calculable. Son objectif principal est d'évaluer l'impact à moyen et long terme des politiques environnementales et énergétiques sur l'économie française. Il vise notamment à répondre aux questions suivantes : quelle est la réduction attendue des émissions de carbone pour chaque mesure politique ? Quels sont les secteurs qui vont croître ou décroître en conséquence ?

ThreeME est utilisé pour la modélisation des scénarios prospectifs ADEME (Visions 2030-2050, Transition(s) 2050). Il est par ailleurs utilisé – à l'instar du modèle IMACLIM du CIREN – par le ministère de la Transition écologique afin de réaliser l'évaluation des Stratégies Nationales Bas Carbone.

Le secteur Résidentiel est représenté explicitement dans un Module Logement. Le secteur tertiaire est intégré de manière implicite via la consommation de services des ménages. Le Modèle Logement permet de générer une dynamique du stock de logements par classe énergétique (DPE). Le calcul central du module est le passage d'une partie du parc de logements d'une classe énergétique à une autre, associé à une matrice de coût par saut de classe. L'équipement de chauffage n'est pas explicite. C'est le temps de retour sur investissement qui permet de « déclencher » des rénovations.

Il est un des rares modèles de l'écosystème étudié à analyser la dimension économique de la transition pour le secteur résidentiel. Un couplage explicite avec le modèle MENFIS (ADEME-CSTB) permettra d'améliorer les équations de prise de décision des ménages.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Modèle d'équilibre général calculable permettant d'évaluer les impacts macroéconomiques sur l'économie française des politiques de transition écologique à horizon 2050 au pas annuel. Il couvre en détail le secteur résidentiel et l'usage chauffage.



Champs et paramètres

En ce qui concerne le bâtiment, les principales unités fonctionnelles du modèle central sont les prix des énergies, les coûts d'investissement, le parc de logement par DPE, et le ménage représentatif.



Chaînages et bouclages

Pour le bâtiment, le modèle a été utilisé dans Transition(s) 2050 en chaînage avec les modèles ANTONIO et VIVALDI qui lui ont fourni les volumes d'activité du secteur. Il a ensuite nourri le modèle MatMat permettant d'établir l'empreinte carbone et matière des scénarios, ainsi que le modèle Matisse permettant de sortir du ménage représentatif et d'évaluer les effets distributifs selon différents types de ménages (revenus, densité urbaine, zone géographique).

A terme, on pourrait imaginer l'utiliser en bouclage (une première version de scénario produite avec ANTONIO et VIVALDI pourrait alimenter ThreeME qui permettrait en retour d'améliorer la modélisation physique de ces deux modèles en y intégrant des éléments de dynamique économique sur les services ou des évolutions plus « lissées » de dynamiques de rénovation)



Questions et enjeux

Le modèle répond aux enjeux de documentation des interactions entre les décisions économiques des ménages pour leur logement (consommation d'énergie, investissement dans la rénovation...) et les évolutions macro-économiques françaises, ainsi que les impacts de la transition sur le budget des ménages. Il est un des rares modèles de l'écosystème étudié à analyser la dimension économique de la transition pour le secteur résidentiel.

4.40.Bat-ADAPT (OID)

Resilience for Real Estate (R4RE) est une plateforme dédiée à l'analyse de la résilience face aux enjeux du climat et de la biodiversité pour les échelles bâtiment et territoire. La plateforme propose plusieurs outils : Bat-ADAPT, pour l'analyse prospective des risques climatiques ; Bat-ADAPT Territoires, destiné aux collectivités ; et BIODI-Bat, pour l'évaluation des enjeux liés à la biodiversité. Parmi ces outils, seuls Bat-ADAPT et Bat-ADAPT Territoires intègrent une dimension prospective.

Le modèle permet d'analyser l'évolution de l'exposition d'un bâtiment ou d'un ensemble de bâtiments aux aléas climatiques à l'horizon 2100. Il offre la possibilité de réaliser un diagnostic du niveau de vulnérabilité de ces bâtiments et d'élaborer une stratégie d'adaptation en s'appuyant sur un catalogue de solutions adaptatives. La plateforme permet de disposer d'un premier niveau d'analyse prospective des risques climatiques associé à un bâtiment (ou un groupe de bâtiments). En rassemblant l'ensemble des aléas pour lesquels des données sont disponibles dans un seul outil, elle permet une analyse multicritère et de prioriser des actions d'adaptation dans le bâtiment.

Les aléas suivants sont ou seront couverts par l'outil Bat-ADAPT de R4RE : Chaleurs (stress thermique et vagues de chaleur), sécheresses, précipitations et inondations (fluviales, remontées de nappes, ...), dynamiques littorales (érosion côtière, submersion marine, élévation du niveau de la mer), tempêtes et vents violents, feux de forêts, grands froids et mouvements de terrain.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Il s'agit d'un modèle bottom-up, à visée exploratoire, basé sur une description des principaux risques climatiques pour les bâtiments. Il prend en compte les bâtiments résidentiels et tertiaires sur le territoire de la France métropolitaine, avec la possibilité d'étendre l'analyse à des bâtiments situés en Europe. Le modèle couvre différents horizons temporels, de 2030 à 2100, et intègre les scénarios d'émissions RCP et SSP du GIEC.



Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle du modèle est l'emprise au sol du bâtiment. Des paramètres décrivant le comportement de l'aléa sont utilisés comme indicateurs prospectifs (climatiques) et non prospectifs (territoriaux). Ces indicateurs servent à analyser l'exposition, laquelle est confrontée aux caractéristiques du bâtiment dans le cadre de l'analyse de vulnérabilité.



Chainages et bouclages

La couche logicielle du modèle a été intégrée dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050, elle a permis de documenter l'évolution de l'exposition du parc immobilier à l'horizon 2050. On pourrait imaginer l'utiliser pour mieux qualifier les besoins de travaux d'adaptation à inclure dans des scénarios prospectifs, pour quantifier des besoins d'investissement et de main d'œuvre associés.



Questions et enjeux

Le modèle documente les enjeux d'adaptation au changement climatique, et pourrait participer à une réflexion plus large sur la manière dont le bâtiment pourrait répondre à un éventuel cumul de crises systémiques (crise climatique, sanitaire, économique...) en fournissant des informations sur l'aspect climatique.

4.41. Outil étude bâtiment (POUGET Consultants / Carbone 4)

La modélisation considérée ici est celle qui a soutenu le rapport de POUGET Consultants et Carbone 4 intitulé « Neutralité et logements – À quelles conditions le secteur résidentiel peut-il atteindre la neutralité carbone telle que définie dans la SNBC ? » Il ne s'agit pas d'un outil au sens strict d'un modèle ou assimilé permettant de renouveler, dans différents contextes ou au fil du temps, un exercice de projection, mais d'un dispositif spécifiquement développé pour les besoins de l'étude mentionnée. La démarche porte sur la simulation de l'évolution de la consommation d'énergie du secteur résidentiel sous contrainte carbone. L'objectif de l'étude, et par conséquent de la modélisation sous-jacente était de montrer comment le secteur résidentiel peut parvenir à la neutralité carbone – telle que décrite dans la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) – en tenant compte des spécificités du parc.

Le parc résidentiel existant a été modélisé à partir d'une typologie distinguant onze catégories de bâtiments, soit 5 catégories pour les maisons individuelles et 6 pour les logements collectifs, représentatives de la diversité du parc de logements français en termes de période constructive, taille, performance énergétique initiale, etc. Pour chacune de ces catégories, plusieurs scénarios de rénovation de l'enveloppe et de changement des équipements (chauffage, ECS et ventilation) ont été modélisés avec le moteur Th-CE-Ex en tenant compte de la réglementation thermique existante, sous 3 climats métropolitains représentatifs.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Il s'agit d'une méthodologie de calcul portant sur le parc de résidences principales, à l'échelle de la France métropolitaine (hors Corse) et projetant les consommations d'énergie et émissions carbone à 2050 dans une logique normative (atteinte de la cible SNBC) et bottom-up.



Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle de base de la méthodologie est le logement, et la sortie principale la consommation d'énergie.



Chainages et bouclages

La méthodologie utilisée n'est chainée ou bouclée avec aucun autre modèle



Questions et enjeux

L'apport principal de l'étude est l'explicitation et la documentation d'une trajectoire d'atteinte des objectifs de la SNBC. La méthodologie développée ne se prête pas à l'exploration d'autres enjeux prospectifs.

4.42.TETE (CIRED)

L'outil TETE (Transition écologique territoire emploi) est un outil destiné à évaluer les emplois créés et détruits par les politiques climat-énergie à l'échelle nationale et territoriale. Cet outil est mis à disposition gratuitement en open source via un site internet dédié.

Il s'agit d'un modèle de simulation bottom-up, techno-explicite, des trajectoires d'emplois associés aux transformations induites par la transition énergétique. Ce modèle porte sur l'évaluation du contenu en emplois des scénarios de transition énergétique, sur l'ensemble des secteurs directement impactés par ces scénarios, au premier rang desquels le bâtiment.

L'outil **TETE** permet de quantifier les emplois, directs et indirects, générés par une partie des activités économiques qui devraient être influencées par la transition écologique, ceci pour la France entière et à un niveau infranational, selon un ou plusieurs scénarios à l'horizon 2050. La conception de l'outil en vue de son utilisation en open source et de son adaptation à différentes échelles se traduisent par la possibilité laissée à l'opérateur de modifier les valeurs prédéfinies par défaut d'un nombre important de paramètres.

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

L'outil **TETE** est un modèle de simulation techno-explicite, bottom-up, fondé sur un tableau entrées-sorties(TES) de l'économie française, qu'il croise avec une projection traduite en volumes physiques de trajectoires de transition énergétique pour produire, de l'échelle nationale à celle d'un EPCI, des trajectoires d'emplois associées.



Champs et paramètres

Le modèle travaille essentiellement dans la **dimension économie**, approchée sous la forme de branches d'activités très désagrégées, qu'il décrit essentiellement à travers les coûts d'investissement et d'exploitation, avec le volume de coûts par branche comme unité fonctionnelle, et sous forme d'emplois, avec le volume d'emplois par branche comme unité, ces emplois étant eux-mêmes décrits par catégorie (type de profession...). Les autres dimensions ne sont traitées que de façon implicite : c'est notamment le cas de celles des bâtiments, des équipements et des ressources, qui sont touchées par la description concrète des actions de transition relevant des secteurs résidentiel et tertiaire, mais pas modélisées en tant que telles.



Chaînages et bouclages

Cet outil est conçu pour s'appliquer au calcul en emploi de scénarios de transition, qui ont vocation à être produits par d'autres approches, s'appuyant ou non sur des modèles, à l'échelle nationale ou territoriale. Il est de ce point de vue ouvert, et ne fait l'objet d'aucun chaînage spécifique avec des modèles existants. Il s'appuie au contraire sur sa description explicite et désaggrégée des branches d'activités, et de leur lien avec différentes actions relatives à la transition énergétique pour favoriser l'entrée manuelle de données de scénarios produits avec une certaine variété d'outils.



Questions et enjeux

Par son périmètre, **TETE** s'ancre évidemment dans le champ des questionnements sur les **dynamiques socio-économiques**. Il traite ainsi déjà d'enjeux liés aux emplois et compétences, et d'une certaine manière, aux questions de financement et de prix sous l'angle de leur rapport avec un contenu en emplois ou la disponibilité de compétences. Bien qu'il puisse en théorie être relié à d'autres enjeux liés à l'évolution plus profonde de l'économie, y compris dans sa dimension sociétale, ou à la différenciation socio-économique entre territoires par exemple, sa méthode de modélisation est sans doute trop contrainte par l'utilisation du TES pour s'ouvrir à une démarche exploratoire.

4.43.Amadeus (RTE)

Le modèle Amadeus s'inscrit dans la suite d'outils développés par RTE pour les besoins d'évaluation prospective de la demande et de l'offre électrique, au service notamment des Bilans prévisionnels. Il s'agit d'un outil de simulation exploratoire à visée prévisionnelle ou prospective, fondé sur une agrégation bottom-up et explicite des consommations d'énergie et sur un moteur interne de calcul de courbes de charge. Il porte sur l'ensemble de la consommation d'énergie dans les secteurs résidentiels et tertiaires, dans le but d'expliquer la demande électrique et d'en déduire par calcul une courbe de charge.

Cet outil est en fait constitué de deux modèles distincts, portant respectivement sur le résidentiel et le tertiaire, construits dans Excel sur l'articulation de couches décrivant le stock de bâtiments et son évolution et les différents usages de l'énergie. Ils sont reliés à un outil interne qui traduit la demande annuelle en services énergétiques reposant sur l'électricité en demande horaire, et produit les courbes de charge correspondantes pour 200 années météorologiques.

L'outil est construit sur le périmètre couvert par le réseau de RTE, et porte donc sur le parc de bâtiments de la France continentale.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Ce modèle de RTE est un instrument de simulation orienté énergie, initialement construit dans une visée prévisionnelle et de plus en plus orienté vers une visée prospective. Il est fondé sur une description explicite, relativement désagrégée des consommations d'électricité. Il couvre dans ce cadre, à l'appui d'une vision globale bouclée de l'ensemble de la demande électrique, l'essentiel du parc résidentiel et tertiaire à l'échelle nationale au périmètre desservi par le réseau RTE.

Champs et paramètres

À l'instar des autres modèles traitant cette problématique, **Amadeus** est centré sur les trois dimensions permettant l'explicitation la plus directe de ces consommations : les **bâtiments** qui en sont le support, les **équipements** qui en sont le vecteur, et les **ressources** énergétiques ainsi consommées. Il intègre toutefois par construction des données relatives à la population et à l'économie, sous la forme très générale de projections démographiques et de volumes d'activité.

Chaînages et bouclages

Les deux modules résidentiel et tertiaire d'**Amadeus** s'inscrivent dans la suite d'outils développés par RTE pour les besoins de plus en plus développés et complexes de ses travaux prévisionnels et prospectifs. Ils sont à ce titre bouclés et chaînés avec d'autres outils traitant d'autres secteurs et n'entrant pas dans le champ de la présente étude, et ces articulations n'ont pas été explorées.

Questions et enjeux

Bien qu'il soit construit pour répondre à des besoins assez spécifiques et opérationnels, le modèle se prête bien, par son approche, à contribuer à l'exploration de nouveaux questionnements. La démarche de RTE évolue d'ailleurs d'exercice en exercice pour s'élargie à de nouveaux sujets, comme l'empreinte au sol du système électrique ou les besoins en matériaux. Ces aspects ne sont pas directement traités dans les modules relatifs à la consommation d'électricité dans les bâtiments résidentiels et tertiaires mais il semble qu'à travers ces développements, **Amadeus** est susceptible de s'ouvrir à des paramètres ou nouvelles hypothèses permettant d'intégrer ces questions. De manière plus directe, le modèle se prête aussi par construction à intégrer davantage, et de façon plus prospective et ouverte des éléments déjà plus ou moins pris en compte, tels que l'évolution des modes de vie (nouveaux usages, sobriété...) ou l'impact du changement climatique sur la différenciation des trajectoires territoriales.

4.44.Outil PTEF (The Shift Project)

La modélisation appliquée au bâtiment s'inscrit dans une démarche plus générale, rassemblée sous le chapeau du Plan de transformation de l'économie française (PTEF). Celui-ci vise explicitement à convaincre les décideurs politiques et économiques de planifier la transition, en s'appuyant sur des propositions concrètes et chiffrées. Le PTEF dans son ensemble vise ainsi la neutralité carbone, au périmètre et à l'échéance de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC). Le PTEF ne constitue pas un outil à proprement parler, ni même une suite d'outils. Il s'agit plutôt d'une démarche hybride, combinant des outils de simulation plus ou moins explicites au niveau sectoriel, et des approches plus transversales, l'ensemble étant structuré par une entrée par secteur de consommation ou d'activité.

Ainsi, s'agissant du bâtiment, le parc résidentiel est abordé par une entrée « logement », tandis que le parc tertiaire est au contraire abordé via des secteurs comme la culture ou la santé. En complément, un chantier transversal traite du sujet sous l'angle « villes et territoires ».

La modélisation résidentielle couvre l'ensemble du parc résidentiel, hors logements vacants (dont le volume est toutefois analysé en lien avec un facteur d'occupation) et les résidences secondaires. Le modèle couvre l'ensemble des usages énergétiques, toutes énergies confondues, avec des approches de calcul différentes selon les usages. L'outil modélise le parc résidentiel et l'évolution de ses consommations énergétiques en intégrant la construction et la rénovation. Son adossement à l'échelle du DPE garantit la lisibilité des résultats.

Positionnement dans la cartographie

Outils et modèles

Modèle portant sur le parc de résidences principales, à l'échelle de la France métropolitaine et projetant les consommations d'énergie et de matériaux à 2050 dans une logique normative (atteinte de la cible SNBC) et bottom-up.



Champs et paramètres

L'unité fonctionnelle du module résidentiel est le logement. Les sorties principales sont la consommation d'énergie et de matériaux.



Chainages et bouclages

Les calculs sur le secteur résidentiel et les branches tertiaires concernées ont été intégrés dans les travaux plus larges autour du PTEF. Il ne s'agit pas à proprement parler de chaînage ou de bouclage explicite, mais d'une attention générale portée à la cohérence entre modélisations sectorielles via des bouclages énergie et matières transversaux.



Questions et enjeux

L'inscription de cette modélisation dans le PTEF permet d'éclairer des enjeux comme ceux de l'emploi ou des moyens de production énergétique.

4.45. Elioth

L'objectif de l'approche « trajectoires » développée par **Elioth** est de fournir un conseil en stratégie de parc bâti en vue d'objectifs de décarbonation, à destination d'acteurs de l'immobilier et de la construction (bailleurs sociaux, foncières, promoteurs...). L'outil développé à cet effet projette l'évolution des consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre associées d'un parc de bâtiments.

L'outil développé dans ce cadre est susceptible d'accompagner différents acteurs dans des contextes différents mais similaires, sans cadre prédéterminé ni périodicité. **Elioth** a par exemple accompagné, avec le Conseil by Egis le bailleur social 3F dans l'élaboration d'un Plan de transition à 2050.

Un outil a été développé sur Excel pour projeter l'évolution du parc du bailleur. L'état initial du parc est établi à partir des données de DPE et de systèmes énergétiques collectées par le bailleur. Une trajectoire d'évolution au fil de l'eau est construite à partir des données d'activité du bailleurs (démolitions, constructions, rénovations...). Afin de construire des scénarios alternatifs d'évolution, différents rythmes et bouquets d'action de performance énergétique (changements de systèmes énergétiques, isolation, exigences extra-réglementaires sur les constructions neuves, accompagnement à la sobriété des locataires...) peuvent ensuite être appliqués à ce parc.

5. Analyse cartographique

Le développement conjoint des cartographies et de l'analyse des modèles, dont la trame par cartographie et la synthèse par outil ont été présentées aux chapitres précédents, permet d'appliquer les premières au second pour obtenir une image composée de l'écosystème de modélisation étudié, dont différents enseignements peuvent être tirés.

Pour rappel, ces cartographies visent pour l'essentiel, à répondre aux questions suivantes :

- **Questions et enjeux** : face aux principales questions soulevées par la transition du secteur du bâtiment et de l'immobilier qui peuvent être identifiées dans le champ prospectif, quelles sont celles que les modèles actuels semblent mal aborder, voire pas du tout ?
- **Champs et paramètres** : pour traiter les questionnements prospectifs auxquels ils cherchent à répondre ou peuvent répondre, en quels termes les modèles appréhendent-ils ce secteur ? quels sont les éléments constitutifs des modèles ? À travers quels objets et leviers décrivent-ils la réalité qu'ils visent à documenter ? Quels éléments, quelles unités fonctionnelles et paramètres utilisent-ils et quelles relations entre eux explorent-ils ?
- **Outils et modèles** : une fois ces éléments descriptifs choisis, comment les modèles fonctionnent-ils ? Quels sont leur périmètre, leurs méthodes de calcul, leur philosophie et leurs résultats ?
- **Chaînes et bouclages** : quels sont, le cas échéant, les liens entre les modèles existants et la nature de ces liens ? Peuvent-ils fonctionner comme un écosystème ?

Les trois premières cartographies ont été conçues pour permettre une exploitation quantitative, qui est présentée dans la suite, mais doit être relativisée par les biais de sélection des modèles et de simplification de leur représentation pour correspondre aux catégories choisies, et constitue surtout à ce titre un support à une analyse qualitative plus fine, s'appuyant sur la connaissance acquise sur chacun des outils étudiés. Cette section présente ces résultats quantitatifs et l'analyse qualitative menée sur chacune des quatre cartographies, ainsi que des enseignements tirés en synthèse.

L'analyse présentée a été réalisée à partir des informations sur les modèles récoltées lors des entretiens et des ateliers. Elle ne prend pas en compte, sauf exception signalée dans les fiches présentées en annexe, les évolutions qui ont pu être apportées aux modèles depuis.

5.1. Cartographie « Questions et enjeux »

La première cartographie permet un comptage du nombre de modèles qui traitent d'ores et déjà explicitement des différents sujets identifiés au titre des « questions et enjeux », ou qui pourraient directement, même s'ils n'ont pas nécessairement été conçus pour cela, s'y rapporter de par leur approche descriptive et/ou calculatoire. Par exemple, un modèle s'attachant à la description de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel pourrait a priori, même s'il n'est pas du tout orienté vers cet enjeu, s'ouvrir relativement facilement à une réflexion sur les usages des sols s'il comporte pour d'autres raisons une description opératoire de l'empreinte au sol du parc de bâtiments qu'il manipule ; il ne le permet pas dans le cas contraire.

5.1.1. Résultats

Avant d'opérer ce comptage, il a semblé utile de repérer plus précisément les liens qui s'établissent entre ces questions et enjeux et les facteurs prospectifs qui ont servi de point d'entrée pour la méthodologie. Les facteurs prospectifs décrits précédemment constituent plutôt, dans la représentation de la modélisation retenue ici, des éléments de fabrication des scénarios à prendre en compte en entrée des modèles ; les questions prospectives représentent plutôt des enjeux que la modélisation devrait permettre d'éclairer. Les deux ne sont évidemment pas dissociés. Le tableau suivant fournit une représentation des liens les plus directs identifiés dans le cadre de cette étude entre ces deux grilles de lecture, tels qu'ils sont établis par les modèles existants ou les interrogations qu'ils suscitent. Ce résultat n'est sans doute, compte tenu de la méthodologie de l'étude, ni exhaustif ni totalement représentatif, d'autant que l'identification de liens, parfois directe, est d'autres fois plus subjectifve. Il permet toutefois de capter de nombreuses connexions entre les deux grilles, en signalant par ailleurs deux degrés différents d'intensité selon la nature plus ou moins forte de chaque interaction ainsi identifiée.

	Facteurs prospectifs						Thèmes de la cartographie « Questions et enjeux »															
	Contexte						Demande			Offre				Politiques								
	01 Démographie	02 Répartition nationale	03 Répartition locale	04 Numérique	05 Ressources ménages	06 Risques systémiques	07 Occupation logements	08 Occupation non résid.	09 Financement immo.	10 Rapport / propriété	11 Environn. bâtiments	12 Main œuvre bâtiment	13 Matériaux, produits	14 Filière constr.-réno.	15 Gestion obsolescence	16 Qualité usage	17 Services immobiliers	18 Gouvernance	19 Environnement	20 Logement	21 Urbanisme	22 Technique
Questions et enjeux																						
Technique	Analyse cycle de vie																					
	Empreinte écologique																					
	Complétude du parc																					
	Bâti / environnement																					
Socio-éco	Prix, financement																					
	Emplois, compétences																					
	Revenus, ressources																					
	Distribution sociale																					
Sociétal	Modes de vie																					
	Évolution population																					
	Chgt environnement																					
Territorial	Différenciation																					
	Articulation échelles																					
	Territoires spécifiques																					
Crises	Chocs internes																					
	Crise du système																					
	Crise géopolitique																					

Tableau 2 – Correspondances principales et secondaires identifiées au croisement des facteurs prospectifs avec les thèmes de la cartographie « Questions et enjeux »

Ce tableau montre comment les questionnements prospectifs qui structurent aujourd’hui les réflexions sur la cohérence des trajectoires de transition écologique pour le secteur du bâtiment et de l’immobilier se connectent aux facteurs prospectifs qui sont susceptibles de structurer, dans le sens de la transition ou non, l’évolution de ce secteur. Dans certains cas, le lien est direct, et même assumé par les modèles, par exemple lorsqu’un outil porte spécifiquement sur la question de l’empreinte en matériaux des bâtiments, qui est à la fois directement reliée à l’un des 22 facteurs prospectifs (matériaux, produits) comme à l’un des questionnements identifiés (analyse en cycle de vie). Dans d’autres cas, le lien est moins immédiat, par exemple lorsqu’un outil s’attache à l’optimisation de trajectoires de neutralité carbone, que l’on peut mettre en relation avec le facteur prospectif portant sur la politique environnementale, même si l’outil ne modélise pas en soi les politiques et leurs effets.

Ce tableau permet ainsi notamment de repérer comment la manière dont un modèle intègre les différents facteurs prospectifs le prédispose, sous réserve d’un dispositif de modélisation adapté (sur le plan descriptif et calculatoire) à traiter les questions et enjeux. Par exemple, un modèle qui n’est pas configuré pour décrire l’évolution de la main d’œuvre du bâtiment sera inopérant pour traiter de l’enjeu de la disponibilité des emplois et compétences nécessaires à la mise en œuvre de la transition ; de même, travailler la question de l’impact des trajectoires bâtiment en analyse cycle de vie impose, d’une manière ou d’une autre, que l’appareil de modélisation prenne en compte des facteurs comme l’utilisation de matériaux, ou les trajectoires de construction ou de rénovation. Elle permet à l’inverse d’identifier, pour

chacun des sujets de questions et enjeux, les facteurs prospectifs qu'il semble nécessaire qu'un modèle ou un ensemble de modèles intègrent prioritairement pour apporter des réponses. Par exemple, éclairer la question du lien entre la transition du secteur bâtiment et immobilier avec l'évolution des modes de vie ne va pas faire particulièrement appel à des facteurs prospectifs tels que l'offre en matériaux ou les politiques techniques, mais peut mobiliser des facteurs relatifs à la façon d'occuper les bâtiments, à l'évolution des services immobiliers, ou de façon plus spécifique encore à la qualité d'usage ou au déploiement du numérique.

D'une manière générale, l'analyse des modèles témoigne d'une grande richesse de l'appareillage de modélisation de l'évolution du bâtiment et de l'immobilier, en quantité et en diversité. Il apporte sur de nombreux aspects, comme les trajectoires de consommation d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre ou la rénovation thermique du bâtiment, un éclairage de grande qualité pour la réflexion prospective. Le décompte du nombre de modèles s'attachant directement, parmi les 45 étudiés, à chacun des 22 facteurs prospectifs l'illustre (figure 11). Avec toutes les réserves liées au biais de représentation des modèles, et la part d'arbitraire que comporte ce dénombrement, dans la mesure où le lien n'est pas toujours explicite, met en évidence ce tropisme : le facteur des politiques environnementales, essentiellement autour de l'objectif de neutralité carbone, est le plus porté dans les modèles, suivi pour l'essentiel de facteurs qui déterminent au premier ordre la trajectoire de consommation d'énergie et donc d'émissions du bâtiment, qu'il s'agisse de démographie, de construction et surtout de rénovation, de politique du logement, etc. À l'inverse, des facteurs qui semblent moins déterminants vis-à-vis de cette préoccupation, comme le facteur du numérique, la question des risques systémiques ou l'évolution des services immobiliers sont visiblement considérés dans les démarches de modélisation comme des déterminants beaucoup plus secondaires.

On peut probablement trouver deux explications à ce tropisme. La première est d'ordre plutôt technique, et porte sur la difficulté plus grande des approches de modélisation développées autour de ces sujets à se saisir des facteurs les plus difficilement quantifiables ou réductibles à des termes appréhendables par les modèles. Mais la seconde, qui semble déterminante, est d'ordre plutôt politique : les approches de modélisation et les outils qui ont été développés depuis plusieurs décennies à l'appui de scénarios pour le secteur du bâtiment et de l'immobilier ont fortement été tournés vers la préoccupation croissante pour la maîtrise des consommations d'énergie et des émissions de ce secteur, et progressivement tournés vers la nécessité d'en assurer techniquement la transition sous cet angle – aux dépens, sans doute, d'autres considérations.

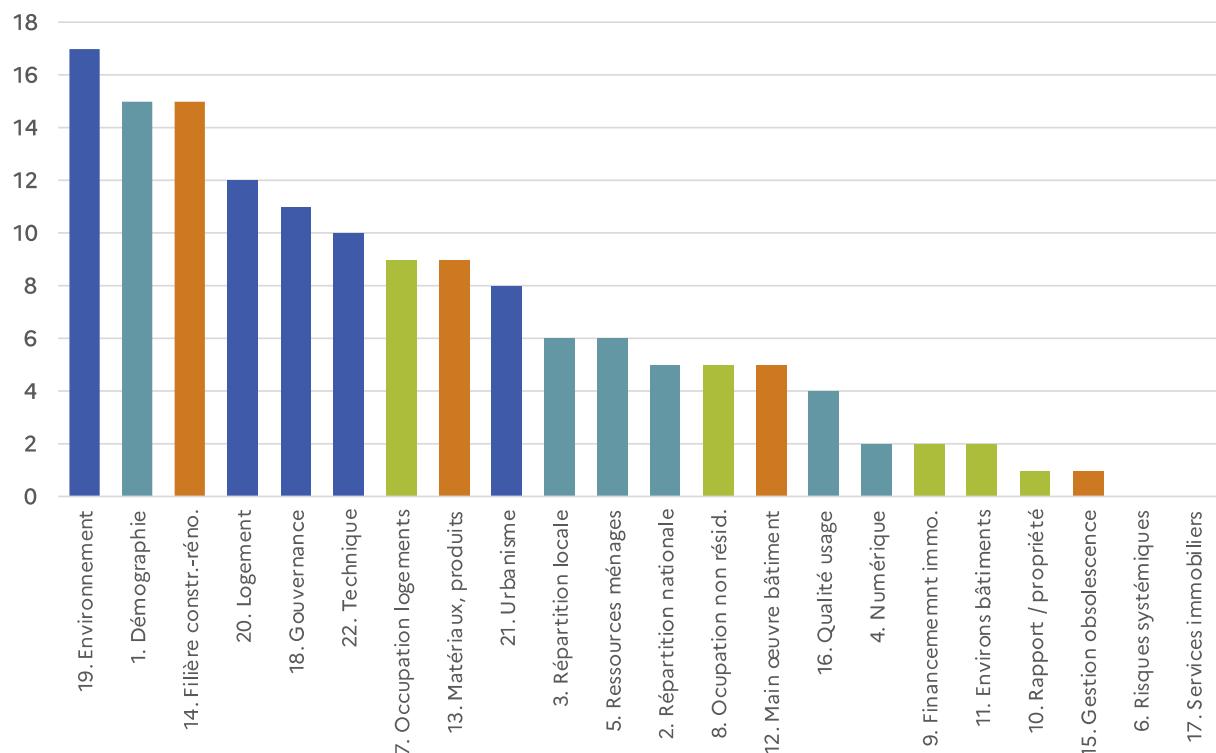


Figure 11 – Nombre de modèles analysés s'attachant directement aux différents facteurs prospectifs

Quoi qu'il en soit, ce déséquilibre se reflète inévitablement dans la manière dont les 45 modèles analysés se relient cette fois des enjeux et questions prospectives. La figure 12 fournit le classement des catégories en fonction de leur taux de correspondance avec les outils, de la plus à la moins couverte ; la figure 13 précise, pour chacun des 42 thèmes détaillés dans la cartographie « questions et enjeux », combien d'outils et modèles peuvent lui être rapportés, sur la base de l'analyse de chaque modèle détaillée en annexe. Il est important de souligner que cette représentation ne caractérise pas le fait que les outils et modèles traitent effectivement les questions et enjeux correspondants, mais leur capacité à le développer, sans juger ici l'effectivité ou la qualité de ce développement. Par exemple, la question des modes de vie vient en premier parce que de nombreux outils présentent des caractéristiques permettant d'intégrer certaines hypothèses de sobriété, même si un nombre limité d'entre eux le font actuellement.

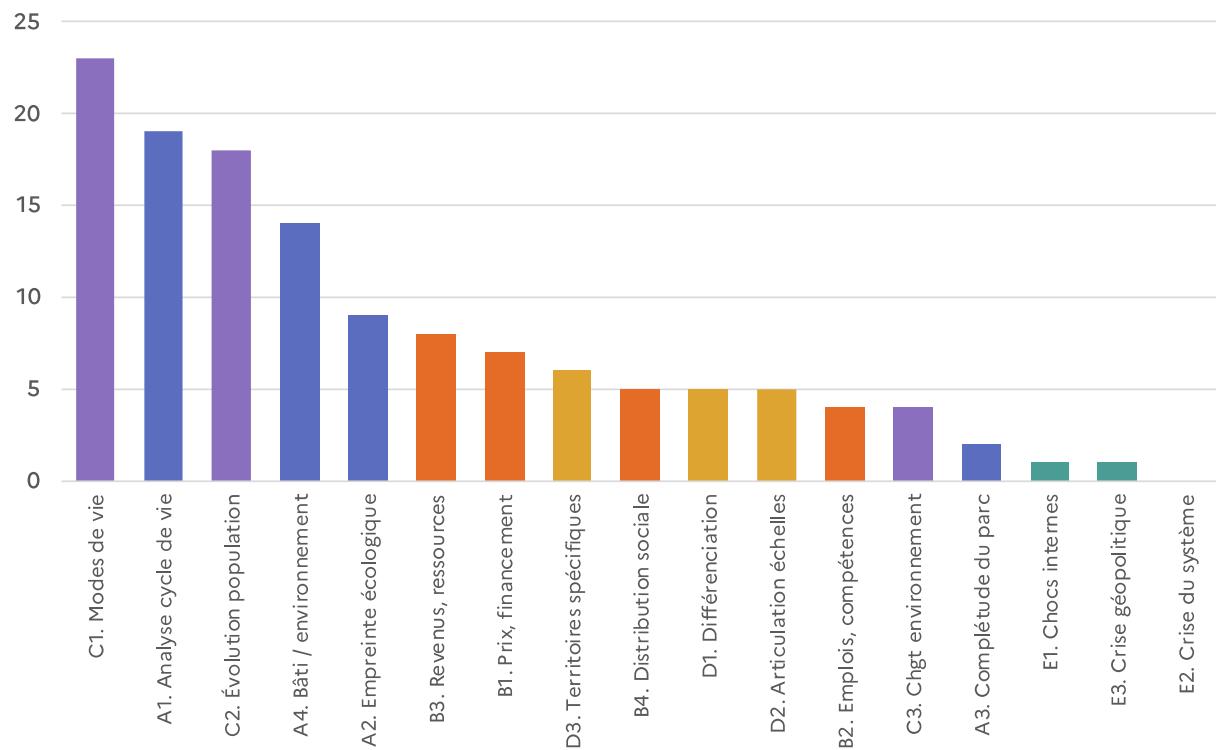


Figure 12 – Nombre de modèles analysés s'attachant directement aux différentes catégories rassemblant les enjeux et questions prospectifs

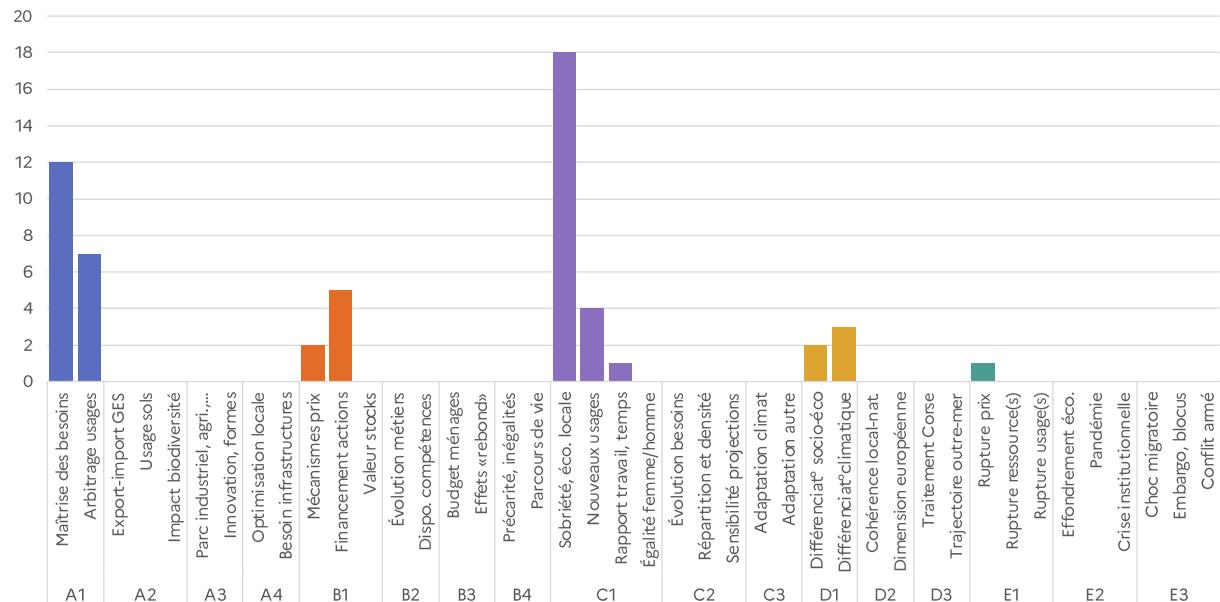


Figure 13 – Nombre de modèles analysés s'attachant directement aux différents enjeux et questions prospectifs

5.1.2. Analyse

Il ressort nettement, à la lumière du positionnement des modèles vis-à-vis de ces facteurs et questionnements prospectifs, que des volets importants de l'analyse prospective restent à couvrir ou à renforcer pour intégrer l'ensemble des facteurs prospectifs dans des trajectoires plus robustes. Globalement, on peut tirer de ces résultats, catégorie par catégorie, les constats suivants :

- **Complétude des aspects techniques** : concernant ces thématiques, certains aspects sont couverts par quelques modèles, notamment la capacité à apporter via une évaluation en cycle de vie un éclairage sur la maîtrise des besoins, voire pour les outils intégrant par exemple une modélisation des matériaux au périmètre de l'ensemble de l'économie, sur les arbitrages d'usage (A1). De même, quelques modèles, un peu moins nombreux, permettent via une approche entrées-sorties des flux de projeter des enjeux en empreinte, ou par la prise en compte de l'emprise au sol des bâtiments d'aborder les usages des sols, auxquels un seul outil est toutefois explicitement dédié ; aucun modèle ne montre en revanche de capacité à traiter les enjeux de biodiversité, qui semblent effectivement difficiles à appréhender dans les approches classiques de modélisation (A2). S'agissant de la complétude du parc, très peu de modèles s'intéressent au parc hors résidentiel et tertiaire ; parallèlement, aucun ne semble ouvert à des évolutions très innovantes en matière de forme ou d'usage bâimentaires (A3). Enfin, un nombre significatif de modèles s'articulent ou pourraient s'articuler avec les enjeux d'intégration du bâti dans l'environnement, prenant en compte soit des aspects d'optimisation à l'échelle locale, soit des sujets d'infrastructures et de réseaux, essentiellement toutefois sous l'angle de l'énergie avec les réseaux d'électricité et de gaz (A4).
- **Prise en compte des dynamiques socio-économiques** : bien que différents modèles intègrent cette dimension (voir cartographie suivante), ils ne le font pas nécessairement dans des termes permettant d'aborder les enjeux prospectifs listés ici. Sur les questions de prix et de financement de la construction et de la rénovation, plusieurs modèles s'appuient pour la construction de trajectoires sur des éléments descriptifs de ce type, même si ce n'est pas dans des termes très ouverts du point de vue prospectifs, mais aucun ne semble conçu pour modéliser cette question d'un point de vue immobilier, en envisageant par exemple l'interaction entre transition et valeur du stock de bâtiments (B1). Les enjeux relatifs à l'évolution des métiers du bâtiment et de la disponibilité des compétences sont bien identifiés, mais assez spécifiques à modéliser, et sont à ce titre essentiellement couvertes par des outils qui leur sont explicitement dédiés (B2).

D'un point de vue plus social, les préoccupations relatives aux revenus et aux ressources des ménages sont traitées ou appréhendables par plusieurs modèles qui décrivent les prix et travaillent à cette échelle des ménages (B3). Dans la continuité, plusieurs sont susceptibles d'interroger l'enjeu de la précarité énergétique, mais beaucoup moins celui de l'interaction entre la transition du bâtiment et les inégalités en général (B4) ; pour finir, aucun modèle ne semble en mesure de désagréger les évolutions moyennes considérées à l'échelle de la population, ou de catégories, pour permettre la description et l'analyse des trajectoires sous l'angle des parcours de vie.

- **Prise en compte des dynamiques sociétales** : du point de vue sociétal, l'articulation des modèles avec les enjeux d'évolution des modes de vie offre une vision très contrastée. D'un côté, on peut comptabiliser de nombreux modèles dont l'approche permet a priori d'envisager, sous l'angle par exemple de leur impact sur la consommation d'énergie ou des besoins en matériaux, des changements concrets se rapportant à des comportements ou des modes d'organisation différents, pouvant par exemple refléter des hypothèses de sobriété ; ils le font toutefois pour l'essentiel dans des termes de modélisation plutôt « ingénieur » ou économiques, manquant d'éléments pour intégrer les causes éventuelles de ces changements ou se relier à des enjeux sociaux plus profonds. Ainsi, beaucoup moins de modèles semblent ouverts à une exploration liée aux nouveaux usages ; un seul intègre, plutôt à la marge, une question de budget-temps, et aucun ne semble taillé pour interroger le lien entre transition du bâtiment et égalité femme/homme (C1).

Dans un registre différent, un nombre important d'outils, intégrant par construction des hypothèses démographiques dans la production de trajectoires sur leur périmètre, se prêtent à une interrogation sur l'évolution qualitative des besoins ou sur la sensibilité à différentes projections quantitatives ; le nombre de modèles susceptibles de rapporter cela à des enjeux de localisation ou de densité urbaine, qui impliquent de mobiliser d'autres dimensions de modélisation, est en revanche plus limité (C2). Enfin, hormis un modèle spécifiquement dédié aux enjeux d'adaptation, on ne dénombre que quelques outils qui, sans être vraiment conçus pour cela, intègrent des éléments descriptifs permettant, au moins sous l'angle du lien entre conditions climatiques, formes bâimentaires et consommation, d'éclairer la

question de l'adaptation au changement climatique ; aucun ne porte en revanche d'éléments susceptibles d'élargir la problématique à d'autres enjeux d'adaptation (C3).

- **Prise en compte des dynamiques territoriales** : bien que la grande majorité des modèles opère sur un périmètre descriptif rapprochant, à l'échelle nationale ou plus locale, le parc de bâtiments étudié d'une notion de territoire, peu de modèles se lient à des enjeux prospectifs liés aux dynamiques des territoires et à leur articulation. En premier lieu, les éléments d'une différenciation socio-économique entre les territoires par rapport à une trajectoire moyenne ne sont véritablement portés que par deux outils ; parallèlement, aucun ne porte directement l'enjeu d'une différenciation liée du point de vue des usages ou de l'adaptation au changement climatique, mais plusieurs s'appuient sur des modalités de description ou de calcul qui permettraient de le faire (D1). Concernant la cohérence entre les trajectoires à différentes échelles, on peut au moins noter que plusieurs outils, sans être focalisés sur cet enjeu, présentent la capacité à travailler à différentes échelles entre l'intercommunalité et le national, voire à les articuler. Dans une projection non plus infra- mais supra-nationale, aucun outil considéré n'intègre en revanche la question de l'insertion de trajectoire nationale dans la dimension européenne (D2). Enfin, quelques outils présentent une capacité à poduire en tant que telles des trajectoires spécifiques appliquées à la Corse ou aux territoires d'outre-mer (D3).
- **Réponse aux crises et discontinuités** : cette catégorie de questions et d'enjeux est clairement celle dont les outils et modèles restent les plus éloignés. Cela peut tenir au fait que certains des sujets sous-jacents, même si aucun n'est réellement nouveau, n'ont émergé que récemment comme préoccupations majeures, à la lumière d'une actualité chargée en crises. Cela tient surtout au fait, en lien peut-être avec ce constat, que l'ensemble des outils repose sur une approche de modélisation que l'on peut qualifier de « continuiste », dans le sens où elle n'intègre pas dans son mode de construction de trajectoires la représentation de ruptures telles que celles que les thématiques de cette catégorie appellent à considérer. L'hypothèse d'une rupture importante sur les prix, et celle d'un choc migratoire, qui peuvent être respectivement envisagées dans un modèle spécifiquement économique et dans un modèle démographique, font figure d'exception. Pour les autres sujets, même si certains modèles de simulation ouverte et très descriptifs pourraient par exemple tenter de les aborder par des approches de type « stress test », où l'on durcit l'une ou l'autre contrainte, ils ne semblent pas se prêter à représenter de véritables ruptures (E1), sans parler des situations plus difficiles encore à appréhender d'un point de vue descriptif par les modèles qui résulteraient d'une crise économique, sanitaire ou institutionnelle majeure (E2), voire de conditions de guerre (E3).

Derrière ces constats, il apparaît clairement aussi que ces manques, relatifs ou plus importants, peuvent faire appel à des évolutions de l'appareillage de modélisation très différentes, en nature et en profondeur, en fonction des thématiques. La discussion de cette cartographie en atelier a mis l'accent, au vu de ces constats, sur les questions suivantes :

- du point de vue prospectif, un enjeu méthodologique majeur porte sur la **capacité des modèles à représenter des crises** : comment intégrer la modélisation des crises aux modèles ? La question qui se pose est de savoir si cela doit se faire dans les modèles mêmes, ce qui implique d'interroger profondément l'approche continuiste sur laquelle ils reposent, puisqu'elle ne paraît naturellement pas vraiment adaptée pour cela, ou si cela peut être traité, dans le cadre des outils actuels, par le jeu de paramétrage des scénarios ;
- ces constats interrogent aussi la **capacité des modèles à représenter les politiques publiques de transition et leur impact**. De manière évidente, l'objectif de transition énergétique et de neutralité carbone est au cœur de nombreux modèles, et semble central dans l'évolution de cet écosystème de modélisation depuis dix ou vingt ans. Mais cela ne semble pas suffisant aujourd'hui par rapport à l'ensemble des enjeux : ainsi, des politiques structurantes comme l'interdiction de location des passoires thermiques, le décret tertiaire, la filière Responsabilité élargie du producteur produits et matériaux de construction du bâtiment (REP-PCMB) ou encore le Zéro artificialisation nette (ZAN) semblent difficiles à appréhender dans la diversité de leurs effets (marché immobilier, impacts économiques et sociaux...) avec l'écosystème de modélisation actuel ;
- plus largement, ces éléments soulignent la nécessité de renforcer la **capacité des modèles à répondre à des questions de transition** sous l'angle de la cohérence des dynamiques économique, sociale et sociétale. Ainsi, il semble par exemple nécessaire de :
 - mieux articuler les trajectoires de sobriété, se traduisant notamment par une baisse de la demande, avec un besoin massif d'investissement pour le développement de filières bas carbone et à faible impact environnemental,

- mieux représenter les effets de la transition sur l'emploi et les structures économiques, autour par exemple du passage des besoins de la construction vers la rénovation, mais aussi plus largement,
- s'assurer davantage de la rencontre entre offre et demande, par exemple sur la quantification des besoins et de la disponibilité de la main d'œuvre (artisans pour la rénovation, etc.) mais aussi du point de vue des services attendus des bâtiments et rendus par eux, ou du point de vue des services et du marché immobiliers,
- savoir coordonner des stratégies de réduction des impacts, notamment de diminution ambitieuse des émissions de gaz à effet de serre, et d'adaptation à des niveaux d'impacts anticipables, et même déjà mesurables;
- enfin, des questions se posent sur la **capacité des modèles à documenter les potentiels des leviers d'action** de la transition, et à mieux représenter les acteurs (citoyens, politiques, entreprises...) et leur capacité à agir dans le système.

5.1.3. Synthèse

En synthèse, l'analyse de la cartographie « Questions et enjeux » permet, tout en soulignant les points forts de l'écosystème de modélisation considéré sur certains enjeux prospectifs bien identifiés et bien intégrés, d'identifier des manques importants et des pistes de progrès.

En premier lieu, ces enseignements concernent la capacité de la communauté des modélisateurs à intégrer – à la fois explicitement dans la modélisation et implicitement dans son utilisation ou son interprétation – les facteurs qui auront un impact sur le secteur du bâtiment et de l'immobilier au cours des prochaines décennies. De ce point de vue, tout d'abord, **la communauté est bien structurée pour intégrer les évolutions liées aux politiques environnementales, à la démographie et aux activités dans le secteur de la construction et de la rénovation**. En effet, nombre d'entre elles ont été explicitement développées pour documenter la consommation d'énergie et les émissions de carbone, ce qui fait des politiques environnementales et de l'activité dans le secteur des paramètres clés et de la démographie une donnée centrale.

La communauté apparaît en revanche moins à même de saisir les évolutions concernant d'autres facteurs clés tels que les politiques d'urbanisme, les bâtiments et leur environnement, les questions de main-d'œuvre ou les ressources économiques des ménages. Elle peine par exemple à interroger la question d'un développement bien coordonné des bâtiments et des infrastructures (de réseaux, de transports, etc.). Ce constat semble d'ailleurs cohérent avec celui qui s'établit sur le panorama des outils au niveau international, selon lequel « davantage de liens avec d'autres modèles sectoriels sont nécessaires pour représenter de manière adéquate la transformation aux échelles urbaines et les approches centrées sur la communauté » (Mastrucci et al., 2023).

Plus encore, **l'écosystème ne semble pas du tout en mesure de capter les évolutions concernant le rapport à la propriété, le financement de l'immobilier, les services immobiliers, ou de prendre en compte les risques systémiques**. Il semble par exemple difficile de s'en remettre aux modèles pour savoir comment la capacité à réaliser la transition écologique des bâtiments serait-elle impactée par une baisse ou une hausse importantes des prix de l'immobilier, ou par de nouvelles crises systémiques (sanitaires, géopolitiques, technologiques...): qui serait touché et comment, et quels ingrédients nécessaires aux trajectoires de transition pourraient en être affectés ? Enfin, intégrer les évolutions dues à la digitalisation de la société, par exemple l'impact du développement de l'Intelligence Artificielle sur les emplois, et donc sur les immeubles de bureaux, nécessiterait sur différents points de s'appuyer sur des projections et des analyses réalisées en dehors de la communauté des modélisateurs des trajectoires bâtiment.

Ces enseignements éclairent également la capacité de la communauté de modélisation à documenter – là encore, à la fois explicitement et implicitement – les principaux défis de la transition. Sous cet angle, la situation est tout aussi contrastée. D'un côté, **la structure des modèles permet de documenter des questions telles que la sobriété ou l'analyse du cycle de vie**, bien appréhendés par leur approche majoritairement physique et techno-explicite. Il apparaît en revanche **plus difficile de saisir les liens entre les dimensions physiques et économiques de la transition** sur des sujets nouveaux, tels que l'impact de la rénovation ou des changements dans les modèles de peuplement sur la valeur des logements), ou **la capacité des bâtiments** (ainsi que de leurs occupants et du secteur professionnel qui leur est associé) à répondre à une variété de crises (augmentation des prix des matériaux et des équipements, perturbations de la chaîne d'approvisionnement, etc.). Une autre faiblesse réside dans la difficulté à représenter des évolutions dans des territoires spécifiques, et plus largement à informer la façon dont les différentes échelles territoriales peuvent être articulées.

5.2. Cartographie « Champs et paramètres »

Pour approfondir, compléter et nuancer ces constats, il est intéressant d'entrer dans la mécanique des modèles, d'abord sous l'angle de leur méthode descriptive, autour de la cartographie « Champs et paramètres », puis plus loin sous l'angle de leur méthode calculatoire, avec la cartographie « Outils et modèles ».

5.2.1. Résultats

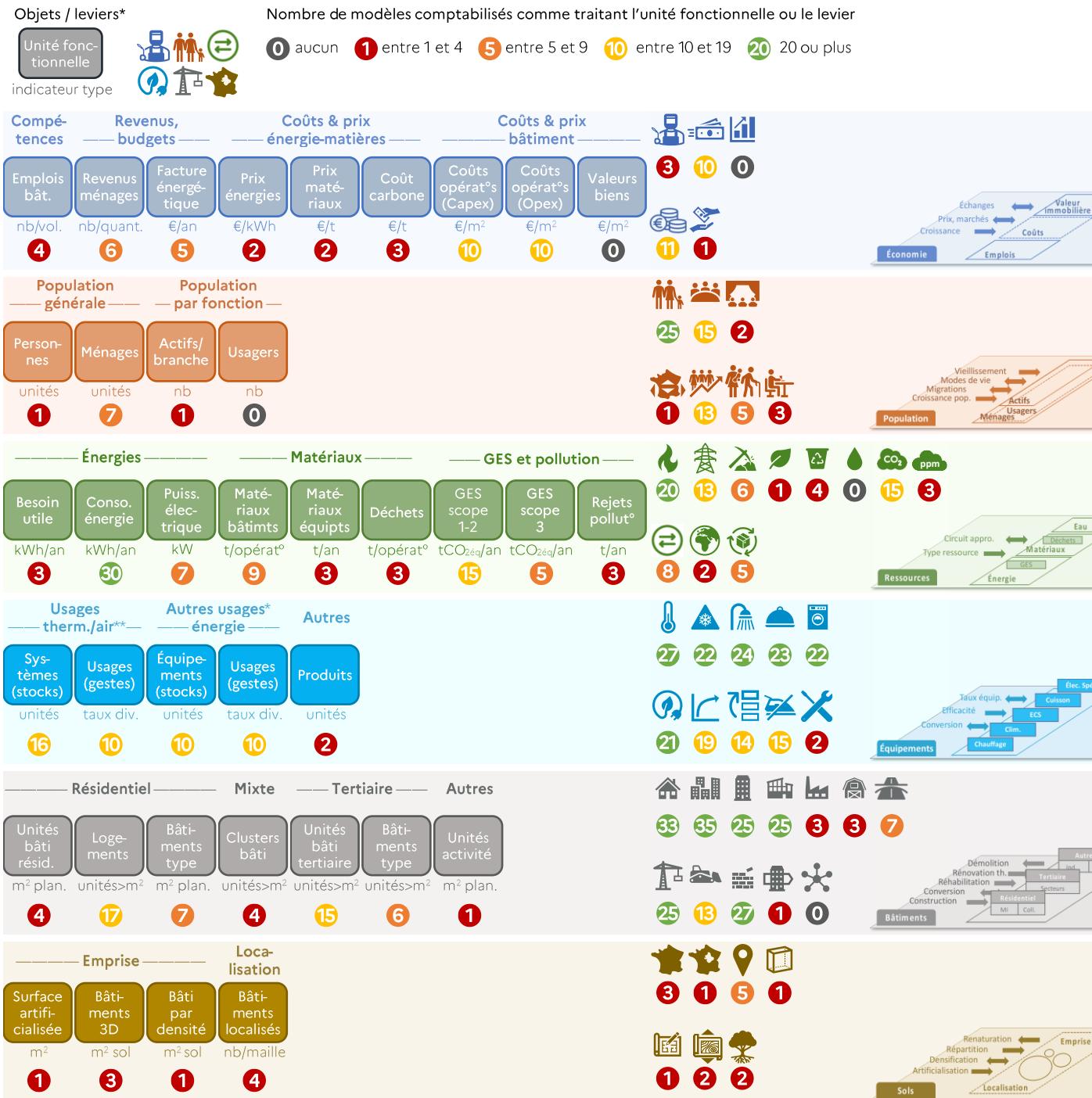
Avant d'aborder les résultats quantitatifs et les enseignements qualitatifs tirés de cette cartographie, il semble utile, comme pour la précédente, de la resituer par rapport à la grille des facteurs prospectifs. Le tableau 3 résume ainsi la manière dont chacune des six dimensions retenues dans cette approche pour analyser les options descriptives des différents outils s'articulent avec les différents facteurs prospectifs. Il illustre, en écho aux constats tirés de la cartographie « Questions et enjeux », que si une partie de ces facteurs agissent d'abord sur le parc de bâtiments lui-même, au sens physique de la dimension « bâtiments » telle que définie ici, ils s'articulent aussi nécessairement avec d'autres dimensions descriptives, qui doivent donc être développées à un niveau et selon une logique correspondants dans les modèles pour leur permettre de traiter pleinement ces facteurs.

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22						
Facteurs prospectifs	Contexte					Demande					Offre					Politiques												
Dimensions	Économie	Population	Ressources	Équipements	Bâtiments	Sols	Démographie	Répartition nationale	Répartition locale	Numérique	Ressources ménages	Risques systémiques	Occupation logements	Occupation non résid.	Financement immo.	Rapport / propriété	Environs bâtiments	Main œuvre bâtiment	Matériaux, produits	Filière constr.-réno.	Gestion obsolescence	Qualité usage	Services immobiliers	Gouvernance	Environnement	Logement	Urbanisme	Technique

Tableau 3 – Principales correspondances identifiées au croisement des facteurs prospectifs avec les dimensions de la cartographie « Champs et paramètres »

La figure 14 représente le comptage de la manière dont les différents outils analysés opèrent, dans les différentes dimensions du champ de modélisation considéré. Elle fait figurer, dans chacune des dimensions, deux aspects : le premier concerne l'identification des unités fonctionnelles repérées dans les modèles pour décrire les « objets » caractéristiques des différentes dimensions (en précisant, lorsque c'est possible, à quelle unité ou indicateur type les modèles font appel pour caractériser des unités fonctionnelles), le second se rapporte aux leviers de transformation agissant dans chaque dimension sur ces unités fonctionnelles. Le comptage porte donc d'une part sur le nombre de modèles utilisant les différentes unités fonctionnelles repérées, et d'autre part sur le nombre de modèles traitant les différents leviers identifiés. On compte ainsi, par exemple, combien d'outils et de modèles font explicitement appel dans leur description au levier rénovation, et combien couvrent essentiellement le résidentiel sous la forme de logements, sans établir toutefois dans cette cartographie de correspondance.

Outre le biais de représentation que peut induire le mode de sélection des outils et modèles, comme discuté précédemment, il faut bien sûr rester prudent dans l'analyse de ces résultats, qui procèdent d'une traduction strictement quantitative d'une information en grande partie qualitative. Néanmoins, compte tenu des contrastes qu'elle fait apparaître, cette représentation semble particulièrement utile pour identifier les tropismes et les angles morts de l'écosystème de modélisation analysé dans l'étude.



Objets: Économie (industrie, commerce, services) emplois / coûts, prix / valeur stocks – Population (ménages, population active, usagers) – Ressources (énergie, électricité, matières premières, biomasse, déchets, eau, GES, pollution) – Équipements (chauffage, climatisation, ECS, cuisson, électricité, spéléologie) – Bâtiments (maisons individuelles, logements collectifs, tertiaire, public, industrie, agriculture, infrastructures) – Sols (national, territorial, emprise) –

Leviers: Économie (investissements, marchés) – Population (migrations, croissance démographique, pyramide des âges, modes de vie) – Ressources (substitution, import-export, circularité) – Équipements (conversion, efficacité, dimensionnement, usage, réparation) – Bâtiments (construction, démolition, rénovation, rénovation thermique, rénovation globale, rénovation partielle, rénovation partielle) – Sols (urbanisme, changement d'utilisation, artificialisation).

* Voir la liste détaillée en annexe.
** On distingue ici les équipements liés à la chaleur et à la qualité de l'air, inclus le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la climatisation et la ventilation, et les autres usages qui englobent la cuisson, l'ensemble des équipements blancs, bruns et autres ainsi que l'éclairage.

Figure 14 – Cartographie des unités fonctionnelles et des leviers mis en jeu dans les différentes dimensions de la modélisation par les outils et modèles analysés

5.2.2. Analyse

Les résultats de cette cartographie témoignent d'abord, de façon nette, d'une concentration importante des efforts de modélisation sur certaines dimensions, ou certains aspects dans les dimensions les plus couvertes, aux dépens des autres aspects et des autres dimensions. Il est évidemment naturel, s'agissant d'un déploiement de modèles visant prioritairement à projeter et interroger la transition énergétique du secteur du bâtiment, que la dimension des bâtiments et celle des usages – ainsi que celle des équipements, à l'interface des deux précédentes – soient les plus représentées dans la démarche descriptive des modèles. Il est en revanche étonnant, compte tenu des interactions à considérer pour intégrer les différents facteurs prospectifs, que les autres dimensions ne soient pas davantage investies : en comparaison des dimensions les plus couvertes, peu de modèles déplacent une capacité descriptive relative à la population d'une part, et aux sols d'autre part ; quant à la dimension économique, qu'ils sont plus nombreux à traiter, c'est en général beaucoup plus pour l'aborder sous l'angle des coûts et des prix des actions relatives aux trois dimensions centrales que pour décrire les emplois ou les valeurs immobilières.

De façon plus détaillée, dimension par dimension, les résultats sont les suivants :

- **Dimension économie** : de nombreux outils et modèles investissent cette dimension, et certains concentrent même leur attention sur elle⁶. Ils l'abordent prioritairement par une description des coûts d'investissement et d'exploitation liés à la vie des bâtiments, avec des unités fonctionnelles essentiellement attachées à décrire des coûts unitaires (de construction, de rénovation, de gestion...), typiquement exprimés en euros par m². Certains d'entre eux, moins nombreux, s'intéressent également aux prix de l'énergie et, lorsqu'ils cherchent à approcher des enjeux liés aux matières premières ou à la réduction des émissions de gaz à effet de serre par un prisme économique, aux prix des matériaux ou à l'introduction d'un coût carbone.

Parallèlement, différents modèles travaillent à l'échelle des ménages et de leur revenus (par exemple en termes de cohortes par quantile) ou, s'agissant de la consommation d'énergie, à la facture énergétique (en montant annuel). Peu de modèles décrivent voire traitent les emplois associés, généralement en termes de nombre d'emplois rapportés à un volume d'activité (lui-même exprimé, selon les cas, en chiffre d'affaires ou en nombre d'opérations). Enfin, aucun des modèles étudiés ne traite explicitement de la valeur des biens du point de vue du marché de l'immobilier.

Par ailleurs, en termes de leviers, les modèles considèrent essentiellement des décisions de dépenses, principalement en investissement, et des effets d'échange sur les différents marchés concernés.

- **Dimension population** : bien que la plupart des modèles intègrent des projections relatives à la population, dès lors qu'ils s'intéressent aux bâtiments et à leur consommation, donc à leur occupation, il est relativement surprenant de constater qu'une majorité d'entre eux font l'économie d'une description de la population en tant que telle : en d'autres termes, ils traduisent directement cette projection sous forme de variations dans les dimensions qu'elle impacte, à savoir celle des bâtiments ou des usages. Ils prennent donc en compte la population, sous la forme d'un nombre global de personnes, de ménages, ou d'actifs (en général ou dans le tertiaire), mais n'ont pas recours à une description permettant de travailler l'interaction de cette dimension avec d'autres.

Ceux qui le font s'intéressent principalement à la population occupant le secteur résidentiel, sous forme de nombre de ménages, et plus rarement à celle du secteur tertiaire, sous forme de nombre d'actifs par branche. Aucun modèle ne semble adopter, vis-à-vis du secteur tertiaire, une approche par nombre d'usagers des commerces ou des services.

Du point de vue des leviers, la plupart des modèles qui intègrent, même de façon globale la dimension population tiennent compte de sa croissance démographique ; peu d'entre eux s'intéressent en revanche à des questions d'évolution de la pyramide des âges et encore moins à des évolutions issues de changements de modes de vie ; pour finir, seul le modèle spécifiquement consacré à la démographie étudié comporte une description des flux migratoires.

- **Dimension ressources** : sans surprise, un grand nombre de modèles traite cette dimension et concentre son travail descriptif sur l'énergie, et corrélativement sur les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les unités fonctionnelles sont naturellement les unités de consommation (typiquement en kWh par an) et d'émissions (en tonnes de CO₂, ou tonnes d'équivalent CO₂ par an). Pour l'énergie, les modèles

⁶ Il convient de rappeler ici que leur nombre est en partie limité par la sélection, qui n'a pas été étendue à divers modèles de nature macroéconomique et top-down, qui n'entrent pas dans une démarche descriptive du parc bâti ou même du secteur du bâtiment, et n'auraient à ce titre pas apporté de valeur ajoutée à l'analyse par rapport aux modèles déjà inclus.

s'intéressant plus spécifiquement à l'électricité traitent aussi de la puissance appelée. Par ailleurs, de rares modèles tentent d'approcher, plutôt que la consommation, un besoin en énergie utile, notamment pour le chauffage.

Côté GES, la plupart des modèles concernés s'intéressent aux émissions directement associées aux consommations, c'est-à-dire aux scopes 1 et 2, mais quelques uns, qui développent une description en cycle de vie et/ou en empreinte, décrivent également des émissions au scope 3. Hormis l'énergie, plusieurs modèles décrivent des besoins en matériaux, pour la plupart au niveau des bâtiments mais aussi pour quelques uns au niveau des équipements, avec des tonnages rapportés respectivement aux opérations (construction, rénovation...) ou aux années d'occupation. Certains de ces modèles incorporent également le volet déchets. D'autres outils traitent, parallèlement aux GES, divers rejets et pollutions. En revanche, aucun ne semble s'attacher à une modélisation de l'interaction entre trajectoire bâtiment et besoins en eau.

Enfin, concernant les leviers relatifs à cette dimension, les modèles concernés activent principalement une description des substitutions, et dans une moindre mesure de la mise en œuvre de la circularité via le recyclage des matériaux ; ils traitent moins, à l'exception des modèles basés sur une logique d'entrées-sorties, de l'évolution des importations et des exportations.

- **Dimension équipements** : cette dimension fait l'objet d'un traitement classique et relativement similaire par de nombreux outils et modèles étudiés. Tous les modèles qui s'intéressent à la trajectoire de consommation d'énergie du bâtiment activent cette dimension, mais tous n'entrent pas nécessairement dans une démarche descriptive du parc d'équipements, raisonnant pour certains au global sur des usages. Ceux-ci sont généralement décrits en distinguant le chauffage, la climatisation, l'eau chaude sanitaire, la cuisson et l'ensemble des usages relevant de l'électricité spécifique. Lorsque ces usages sont décrits, c'est généralement via les unités de systèmes (de chauffage, de climatisation) et d'équipements, parfois croisés avec les conditions d'utilisation. Compte tenu de son rôle particulier, un nombre plus important de modèles se concentrent sur le chauffage. Par ailleurs, de rares modèles s'intéressent aux équipements sous la forme de produits, en lien avec leur approche sur les matériaux.

Les leviers décrits et appliqués dans cette dimension par les modèles sont, classiquement là encore, la conversion (des systèmes de chauffage) – qui est le plus activé –, l'efficacité des équipements, leur dimensionnement, le niveau d'usage, et pour les quelques modèles s'intéressant aux produits, la réparation.

- **Dimension bâtiments** : en cohérence avec le champ de l'étude, la quasi-totalité des modèles prennent cette dimension en compte (les exceptions concernent par exemple un modèle macroéconomique top-down, ou un modèle démographique). Et même si certains en restent, en fonction de leurs besoins de modélisation, à une prise en compte globale des bâtiments sans plus de détail descriptif, presque tous entrent dans un niveau plus ou moins grand de description pour distinguer des catégories et opérer des calculs. La plupart des modèles séparent, pour traiter l'un ou l'autre ou les deux, le secteur résidentiel et le secteur tertiaire, à l'intérieur desquels ils couvrent ensemble ou distinctement maisons individuelles et logements collectifs, et tertiaire privé et public.

Les bâtiments sont presque systématiquement quantifiés sous la forme de m² de surface de plancher (sans entrer ici dans la norme de comptage de ces surfaces utilisées), mais regroupés selon des logiques fonctionnelles différentes : pour le résidentiel, l'unité fonctionnelle privilégiée par les modèles est le logement (en unités), certains travaillant plutôt avec des unités de bâti résidentiel (directement exprimées en surface), ou des bâtiments type ; pour le tertiaire, l'unité fonctionnelle privilégiée est la surface d'activité (unité de bâti), certains modèles opérant alternativement avec des bâtiments type. Quelques modèles, travaillant plutôt à une échelle cadastrale ou proche du cadastral, privilégnient une approche mixte dont l'unité fonctionnelle est de type cluster bâti, résidentiel et tertiaire confondus.

Au-delà du résidentiel-tertiaire, très peu de modèles couvrent d'autres types de bâtiments (industriels, agricoles), généralement sans qu'on identifie une démarche descriptive plus précise. Enfin, un nombre non négligeable de modèles prennent en compte les infrastructures : certains le font sous l'angle des besoins en matériaux du BTP en général, un modèle l'aborde sous l'angle de l'artificialisation, et d'autres l'envisagent de façon plus ciblée, plutôt sous l'angle des réseaux de distribution de l'électricité ou du gaz ; il n'apparaît pas d'unité fonctionnelle claire, hormis un comptage en unités d'activité.

Concernant pour finir les leviers de transformation des unités de bâtiment qu'ils manipulent, les modèles intègrent de façon presque systématique la construction et la rénovation (centrée sur la rénovation thermique, mais pouvant également inclure la réhabilitation) et souvent, même si cela est moins clair, la démolition. Un seul semble en revanche travailler explicitement sur le levier de la

conversion d'usage des bâtiments (par exemple, réhabilitation de locaux tertiaires en locaux d'habitation), et aucun sur la description de trajectoires de mutualisation.

- **Dimension sols**: la question de l'occupation des sols par les bâtiments, que ce soit sous l'angle de leur emprise en lien avec une préoccupation sur l'artificialisation des sols ou de leur répartition, en lien avec des enjeux d'optimisation locale et de formes urbaines, est la dimension la moins bien investie par le corpus de modèles retenus. Seule une petite minorité de modèles développe des éléments descriptifs s'y rapportant, même si parallèlement un certain nombre d'autres outils travaillent à une échelle de localisation qui semble leur permettre de développer cette approche.

Les modèles opèrent selon plusieurs logiques : l'emprise au sol peut être approchée soit directement par une unité fonctionnelle de surface artificialisée, soit par la projection au sol d'unités bâimentaires représentées en 3D, soit encore par des blocs de bâti comptabilisés selon leur densité ; une autre approche, tournée plutôt vers les enjeux de répartition ou de différenciation de zones, consiste à comptabiliser des unités de nombre de bâtiments par maille territoriale (typiquement, la maille IRIS).

À travers ces approches, les rares outils concernés activent donc à la fois des leviers pouvant se rapporter à des politiques d'urbanisme ou d'aménagement, des possibilités de changement d'usage, et les actions d'artificialisation, qui intègrent, en miroir, la renaturation.

Au-delà de cette analyse par dimension, on peut tirer plusieurs constats généraux ou transversaux sur les points forts et les points faibles, à l'échelle du faisceau d'approches descriptives déployées par les modèles étudiés, qui ont notamment été présentés et discutés en atelier :

- tout d'abord, on peut observer que la cartographie fait ressortir un nombre relativement limité de grandes unités fonctionnelles en regard de l'étendue du champ couvert. Même si ce constat découle en partie artificiellement d'un effort de regroupement des unités opérées par les modèles, il est aussi le reflet d'une certaine convergence des approches de représentation. On peut s'interroger sur l'absence d'une plus grande diversité, mais surtout souligner que cette situation est favorable au dialogue des outils. Par exemple, les participants à l'atelier ont noté que le volet « équipements » est déjà bien couvert avec une approche bien stabilisée, ce qui ouvre des possibilités de réutilisation ;
- on peut à l'inverse noter que cette convergence ne va pas jusqu'à l'homogénéité. En particulier, dans les dimensions prioritairement couvertes que sont celles des bâtiments, des équipements et des ressources, la proximité d'une majorité d'approches n'empêche pas d'observer quelques disparités internes, qui reflètent la variété des points de vue des modèles et contribuent à la richesse de l'éclairage apporté collectivement par l'appareillage de modélisation dans ces trois dimensions ;
- de ce point de vue, il ressort aussi que certaines unités fonctionnelles semblent montrer une facilité particulière d'usage à différentes échelles, dans différentes dimensions et dans différents chaînages entre dimensions. C'est le cas par exemple du nombre de logements et de leur surface moyenne, qui s'avèrent centraux dans l'approche descriptive de la dimension bâtiments, tout en s'articulant relativement facilement avec la dimension population via le nombre de ménages, la dimension des équipements via des taux d'équipement, celle des consommations... Il y a sans doute un intérêt à intégrer dans l'évolution des modèles le développement d'unités fonctionnelles communes, sans les placer au centre de chaque outil mais en faisant en sorte qu'elles puissent y être prises en compte et décrites le cas échéant à partir d'autres, afin d'offrir par ce biais à langage commun aux différents outils. Une telle démarche semble d'ores et déjà envisageable sur les dimensions les plus complètes, et mérite d'être envisagée dans la perspective du développement des autres dimensions ;
- ce développement reste nécessaire, car parallèlement à ces constats, des pans de plus ou moins grande importance restent peu ou pas du tout couverts par l'appareillage descriptif des modèles. On peut notamment pointer ici :
 - l'absence de développement descriptif permettant de prendre en compte la valeur immobilière des biens et du foncier, et donc d'articuler ce volet de la dimension économie avec d'autres dimensions, alors que l'évolution de cette valeur peut être fortement liée aux actions sur le parc, et conditionner celles-ci en retour,
 - l'absence quasi-totale également de représentation de la question de l'eau, alors que la préservation et l'utilisation de cette ressource constituent, dans la perspective du changement climatique, une préoccupation croissante,
 - la faiblesse des développements descriptifs sur l'emprise au sol des bâtiments (en regard de la richesse de description des bâtiments eux-mêmes, ou d'une autre dimension technique associée

- comme celle des équipements), alors que cette capacité descriptive est cruciale pour explorer l'enjeu de l'artificialisation,
- le fait que la capacité à décrire le contexte environnemental et territorial des bâtiments, pour modéliser cette dimension dans les trajectoires projetant une transformation du parc bâti, reste pour l'essentiel à développer,
 - la prépondérance, s'agissant de l'énergie, d'unités fonctionnelles liées à la consommation au sens de la facture plutôt qu'à la mesure des besoins et des services rendus, qui constitue un obstacle à une plus grande ouverture des modèles à des hypothèses explicites de sobriété ;
 - ainsi, d'une manière plus générale, les faiblesses observées réduisent la capacité de l'appareillage de modélisation à traiter certaines relations, pourtant fortement liées aux principaux facteurs prospectifs comme aux questions et enjeux précédemment discutés.

5.2.3. Synthèse

En synthèse, l'analyse de la cartographie « Champs et paramètres » apporte une image relativement complète, et contrastée des modes descriptifs déployés par les modèles dans le champ de la transition du secteur bâtiment et immobilier, permettant de faire ressortir quelques points forts et faiblesses.

Tout d'abord, en ce qui concerne **les paramètres**, la communauté des modèles s'appuie sur un nombre relativement limité d'unités fonctionnelles. Cela facilite le dialogue entre les modèles, mais reflète également une certaine convergence des approches dans les manières de représenter la réalité, ce qui ouvre le risque d'angles morts. Par exemple, dans les modélisations, la consommation d'énergie est essentiellement approchée en croissant dans la dimension « équipements » des unités fonctionnelles liées aux systèmes (de chauffage, de climatisation...) et aux appareils d'une part, et à leur usage d'autre part (taux d'équipement, taux d'utilisation, taux d'adoption de changement d'usage...), et bien que plusieurs modèles utilisent pour cela une modélisation des stocks d'équipements, un seul exprime la consommation d'énergie sur la base d'une description par les produits : or celle-ci peut permettre une vision plus riche des matériaux nécessaires et, par conséquent, de la consommation de ressources associée aux changements d'équipements.

À l'inverse, certains sujets sont représentés par une certaine diversité d'unités fonctionnelles qui permet d'explorer de multiples dimensions de la transition. Par exemple, dans le secteur résidentiel, l'unité de base est soit le bâtiment lui-même, ce qui permet en principe d'aller vers des calculs sur l'emprise au sol, soit le logement lui-même, ce qui permet des calculs thermiques, soit un bâtiment type, ce qui permet des calculs rapides basés sur une typologie tels que les matériaux nécessaires pour rénover différentes typologies de bâtiments. Cependant, le déploiement de ces différentes approches dans les modèles s'opère souvent de façon dissociée, chaque outil privilégiant l'une ou l'autre sans les croiser, ce qui limite la capacité à articuler ces enjeux. Enfin, seul un nombre limité de modèles s'appuie sur des données localisées, ce qui complique l'analyse territoriale, du moins sa prise en compte à une échelle plus grande que locale.

Plus largement, les résultats de cette cartographie illustrent le biais qu'a pu introduire dans le déploiement de cet écosystème de modélisation ce qui en a probablement constitué le principal moteur, montrant comment **les efforts de description dans les modèles se concentrent sur certaines dimensions et certains aspects**, essentiellement liés aux enjeux de la décarbonation de l'énergie dans le bâtiment, **aux dépens d'autres enjeux pourtant reconnus aujourd'hui comme importants**, qu'il s'agisse par exemple de l'artificialisation des sols, des besoins en infrastructures, ou de la cohérence entre transition énergétique et trajectoire immobilière.

Ce constat se retrouve dans la manière dont les modèles appréhendent globalement **les leviers d'action**. D'une manière générale, la communauté des modélisateurs dispose d'un grand nombre de modèles capables de documenter les leviers clés de la transition énergétique. C'est le cas, dans la dimension bâtiments, des leviers mobilisés pour décrire l'évolution de la performance énergétique de leur enveloppe, qu'il s'agisse d'une rotation du parc liée à la construction neuve (même si davantage de modèles intègrent une description des constructions que des démolitions...), ou surtout de son amélioration par la rénovation. C'est également vrai pour la modélisation de la consommation d'énergie, en particulier pour les leviers qui reposent sur des changements plus facilement appréhendables par les modes de description technique que privilégient les modèles, tels que la conversion vers des équipements énergétiques moins carbonés (chaudières à bois, pompes à chaleur, etc.), l'augmentation de l'efficacité des équipements ou leur dimensionnement. C'est un peu moins le cas dans le champ de la sobriété, pour les actions qui se rapportent plus spécifiquement à une évolution des modes d'utilisation des

équipements (durée d'utilisation, taux d'équipement, etc.). De plus, un seul modèle permet explicitement de mettre en œuvre la réparation des équipements. En remontant au niveau des bâtiments, les leviers jouant sur le changement d'usage et la reconversion de locaux (par exemple de passer d'un usage de bureaux à un usage résidentiel) ou la mutualisation (utilisation flexible et partagée de l'espace du bâtiment pour différents usages) sont également très peu intégrés.

Ainsi, l'appareillage de modélisation apparaît moins bien équipé pour représenter les leviers plus largement associés aux enjeux environnementaux, qu'ils soient liés aux économies de ressources matérielles ou au problème d'artificialisation des sols. Ceci fait d'ailleurs écho à la revue des modèles de construction au niveau international (Mastrucci et al, 2023) qui souligne la difficulté de représenter les durées de vie des bâtiments et leur réutilisation.

Plus largement, on peut également noter que si les modèles intègrent des leviers relativement classiques dans leur approche descriptive des champs économique et démographique, ils semblent très peu explorer la possibilité, voire la nécessité de développer dans ces dimensions des leviers spécifiquement adaptés à la description des besoins et à l'articulation de facteurs de changement dans le domaine économique et social avec les leviers de transformation qu'ils activent dans les dimensions plus physiques. Par exemple, les modèles semblent peu préparés à travailler des dynamiques liées à l'évolution des transactions ou des services immobiliers, à l'évolution des besoins en fonction de la pyramide des âges de la population ou encore à une réorganisation de l'articulation entre temps de travail et temps domestiques, faute de disposer d'éléments descriptifs adéquats.

5.3. Cartographie « Outils et modèles »

Cette cartographie des modèles dans leur dimension statique, au travers de leur démarche descriptive, doit être complétée par une cartographie de leur dimension dynamique, c'est-à-dire de leur démarche calculatoire. C'est l'objet de la cartographie « Outils et modèles », qui cherche à appliquer le même principe de comptage des outils que la précédente, mais cette fois sur des caractéristiques telles que le périmètre technique sur les bâtiments, géographique et temporel auquel ils opèrent, leur mode de calcul, et les impacts qu'ils cherchent à évaluer. Cette cartographie recoupe en partie celle des « champs et paramètres », dans la caractérisation des objets qui constituent pour les modèles des données d'entrée ou des résultats, elle apporte des enseignements très complémentaires.

5.3.1. Résultats

La figure 15 reprend donc la trame de cette cartographie « Outils et modèles » en quantifiant, comme dans la cartographie précédente, la densité de prise en charge dans les modèles des différents éléments relatifs au périmètre, à la mécanique de calcul et aux impacts calculés par les outils. Comme pour la cartographie « Champs et paramètres », ces résultats doivent être interprétés en gardant en tête l'effet de biais de représentation potentiellement induit par la méthode – la construction même de cette trame cartographique est centrée sur la démarche d'évaluation de différents impacts associés à des trajectoires de transformation du bâtiment, qui est au cœur de l'effort de modélisation. Il faut également prendre en compte le caractère réducteur de cette information quantifiée par rapport à la richesse et à la nuance des outils analysés.

Ces résultats produisent toutefois, comme pour la précédente, une image suffisamment contrastée pour en tirer quelques enseignements sur les catégories et modes opératoires les mieux couverts, ainsi que ceux qui sont comparativement moins intégrés, voire apparemment absents dans l'appareillage de modélisation. La nature exploratoire de la démarche menée, et sa méthodologie ne permettent pas de garantir que des éléments apparaissant comme des lacunes dans cette cartographie ne soient pas traités dans des modèles non repérés ; toutefois, l'aller-retour opéré pendant l'étude entre la prise de connaissance des outils et la construction de cette cartographie, comme des autres a justement permis d'orienter les recherches : par exemple, on a d'autant plus recherché, sans succès, des outils intégrant les enjeux de gestion immobilière dans la construction des trajectoires de transition du bâtiment à mesure que ce manque apparaissait.

Cette analyse par « compte » de modèle permet une première approche globale des modes calculatoires opérés par l'écosystème. Pour aller plus loin, il serait nécessaire d'analyser les modèles plus en détail pour mieux comprendre si la présence de beaucoup de modèles est un signe de diversité, et, à l'inverse, le fait que certains sujets ne soient couverts que par un ou deux modèles, un signe de fragilité. L'analyse fine de chaque modèle sous cet angle est en dehors du champ de cette étude.

Prise en charge dans les modèles : 5+ outils 3-4 outils 1-2 outils aucun outil non évalué

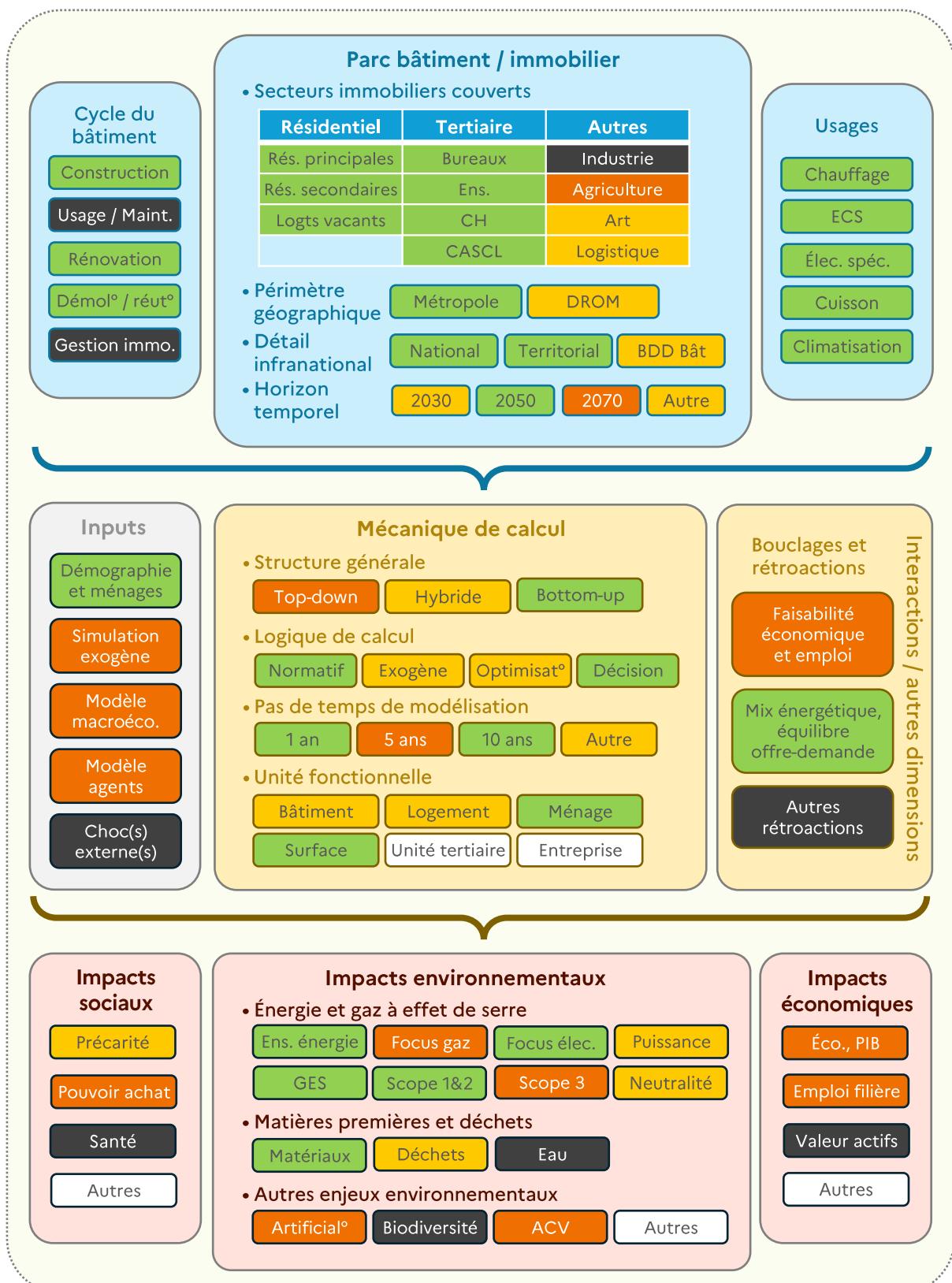


Figure 15 – Cartographie des principales entrées, des principaux modes de calcul et des principaux impacts modélisés par les outils et modèles analysés

5.3.2. Analyse

En première approche donc, les principaux résultats de cette cartographie des modes de calcul repérés dans les modèles sont les suivants :

- **Parc bâtiment / immobilier** : dans ce premier bloc, les résultats sont d'abord conformes à ceux que présente la cartographie « Champs et périmètres », s'agissant des dimensions et objets qui peuvent entrer dans le périmètre technique soumis au calcul dans les modèles. Ainsi, concernant le parc de bâtiments lui-même, les différentes catégories de bâtiments ou de locaux résidentiels et tertiaires sont bien couverts, alors que les bâtiments de l'industrie, et dans une moindre mesure de l'agriculture et de catégories tertiaires particulières sont moins pris en compte dans les trajectoires. Comme évoqué précédemment aussi, les étapes du cycle de vie du bâtiment sont inégalement couvertes, la construction, la rénovation et la démolition ou réutilisation entrant dans le périmètre de calcul de nombreux outils, là où l'évolution des usages, la maintenance et la gestion immobilière sont au contraire ignorées. Enfin, l'ensemble des usages associés à des consommations d'énergie dans les bâtiments est également largement pris en compte.

D'autres aspects repérés dans cette cartographie concernent le périmètre géographique et temporel. Sur le premier point, les résultats confirment d'abord les résultats de la cartographie « Questions et enjeux », à savoir la concentration des modèles sur le territoire national au niveau de la France métropolitaine, voire hexagonale, et la faiblesse de la prise en compte des territoires d'outre-mer ; de nombreux outils opèrent par ailleurs au niveau national, d'autres à différentes échelles territoriales, mais seul un petit nombre opère avec la granulométrie fine permise par les bases de données bâimentaires. Sur le second point, la majorité des modèles concentre son horizon de projection sur 2050, échéance fixée notamment pour les objectifs en matière d'émissions de gaz à effet de serre, même si cet horizon peut dans certains être ajusté ; quelques modèles intègrent explicitement une projection à 2070 (dans l'idée par exemple de permettre d'aller au bout d'une trajectoire de transformation qui n'est pas achevée en 2050), et un peu plus à 2030 (dans une approche moins prospective et plus prévisionnelle), et quelques modèles enfin travaillent sans horizon fixé par exemple (en proposant une projection annuelle, en fonction d'hypothèses de changement par rapport à la situation actuelle, sans calculer la trajectoire et donc sans associer cette projection à un horizon de temps particulier).

- **Méthode de calcul** : en premier lieu, la grande majorité des modèles retenus opèrent selon une structure générale « bottom-up », contre un ou deux seulement en « top-down ». Ceci ne reflète pas nécessairement l'absence en soi de modèles relevant de cette approche, même s'ils sont clairement moins nombreux que les premiers, mais plutôt la difficulté à les faire entrer dans le périmètre de l'étude, dans la mesure où ils ne disposent par construction que de peu d'éléments pour travailler spécifiquement une trajectoire du secteur bâtiment. Plusieurs modèles développent en revanche une approche hybride, soit dans une démarche économétrique, en mêlant le top-down d'une modélisation des équilibres économiques et le bottom-up de représentations technico-explicites sectorielles, soit dans des approches de simulation technique ou technico-économique, en combinant une méthode par agrégation sur les aspects où les données désagrégées existent, et par désagrégation sur les autres.

Du point de vue des logiques de calcul, les modèles témoignent avant tout d'une très grande diversité. On peut toutefois considérer qu'une bonne majorité s'inscrivent dans une démarche de simulation, à visée plutôt normative, en général autour d'un objectif climatique, mais aussi dans certains cas plus ouverte et construite à partir d'éléments de contexte exogènes. Un nombre plus réduit de modèles opère selon une méthode calculatoire d'optimisation. Enfin, plusieurs outils s'inscrivent dans une logique de réponse à différents inputs en vue de fournir une aide à la décision.

Comme on l'a vu avec la cartographie précédente, les outils travaillent principalement, pour modéliser l'évolution du parc bâti dans le cadre de leurs calculs, avec une approche par ménages pour le résidentiel et par surfaces d'activité pour le tertiaire, certains appliquant plutôt leur calcul aux logements, ou directement à l'échelle de bâtiments. Ils procèdent par ailleurs le plus souvent au pas d'un bilan annuel (avec pour certains une déclinaison au pas horaire, en lien avec les enjeux de demande électrique), généralement calcul par année et pour certains par jalons de 10 ans (plus rarement au pas de 5 ans), et parfois selon une autre logique.

En termes d'incorporation dans leurs données d'entrée d'inputs calculés, ou de prise en compte dans leurs calculs d'effets de bouclage ou de rétroactions, les résultats montrent un niveau d'intégration relativement limité. En entrée, de nombreux modèles ont recours à des données de projection démographique, généralement toutes issues de la même modélisation, et de rares modèles intègrent des inputs issus de simulations exogènes (par exemple, sur différentes trajectoires climatiques), de

modélisation macroéconomique ou de modélisation des comportements d'agents (par exemple, sur l'évolution de l'attitude des ménages vis-à-vis de la rénovation). Conformément au constat tiré de l'absence de représentation de cet enjeu prospectif dans la cartographie correspondante, aucun modèle n'est construit pour recevoir en entrée des données issues de la modélisation de chocs externes, quelque soit leur nature. S'agissant d'effets de bouclage avec d'autres éléments ou systèmes que la trajectoire des bâtiments qui seraient directement intégrés dans les outils, les modèles témoignent principalement d'une prise en compte de l'articulation avec le système énergétique (essentiellement sous l'angle de l'électricité, mais dans un cas aussi du gaz); celle-ci relève d'ailleurs davantage d'une modélisation énergétique déclinée sur le secteur bâtiment que l'inverse. Quelques modèles intègrent directement une analyse de bouclage avec des enjeux de faisabilité économique, via des mécanismes de modélisation tels que la réaction des acteurs aux politiques publiques, et de disponibilité des emplois et compétences ou via des modélisations ciblées ; au-delà, on n'identifie pas clairement d'autres types de rétroactions embarquées.

- **Impacts environnementaux et autres**: en lien avec l'approche générale de l'étude, la cartographie s'intéresse d'abord aux impacts environnementaux. On retrouve dans les résultats des modèles, sous l'angle calculatoire, les nombreux éléments précédemment identifiés, sous un angle descriptif, dans la dimension des ressources : les outils sont nombreux à produire des résultats sur l'ensemble de l'énergie, avec parfois un focus sur l'électricité (modèle au périmètre électrique, ou portant un développement plus précis sur ce point), souvent associé à un résultat en puissance, et de façon plus singulière un focus sur le gaz. Ils sont presque aussi nombreux à fournir des résultats en émissions de gaz à effet de serre, généralement calculées au périmètre des consommations directes (scopes 1 et 2), mais parfois aussi au périmètre des émissions indirectes (scope 3). Comme on l'a déjà observé, un seul outil produit des calculs relatifs à l'artificialisation des sols – contrastant avec le fait que l'objectif zéro artificialisation nette est aujourd'hui inscrit dans la loi –, aucun sur les impacts sur la biodiversité.

Pour finir, dans le domaine des impacts économiques et sociaux, le périmètre des calculs proposés reste relativement limité. L'enjeu de la précarité énergétique, et son lien avec des stratégies de rénovation, est traité par quelques modèles, et la question du pouvoir d'achat par un ou deux, mais les impacts sur la santé, par exemple, ne sont pas abordés, ni d'autres impacts sociaux. Dans le domaine économique, les interactions avec les indicateurs classiques tels que le PIB ou la facture énergétique du pays sont calculées par de rares modèles posant les enjeux de la transition du bâtiment à l'échelle de l'ensemble de l'économie, et les besoins en emplois liés à l'évolution de la filière sont directement l'objet des calculs proposés par deux modèles. En revanche, aucun modèle ne semble calculer d'impact explicitement lié à la transition sur des indicateurs spécifiques tels que la valeur des actifs immobiliers.

Parmi les enseignements généraux que l'on peut tirer de ces résultats et des échanges complémentaires auxquels ils ont donné lieu en atelier, on peut souligner les éléments suivants :

- d'une manière générale, les choix calculatoires sont non seulement liés, bien sûr, au type d'analyse en soutien desquels les modèles sont développés, mais aussi à la disponibilité des éléments jugés nécessaires aux calculs envisagés. Sous cet angle, les choix opérés dans la démarche descriptive des outils peuvent être considérés comme une forme de compromis entre ce qu'ils souhaitent calculer et la matière dont ils disposent pour le faire – un corollaire étant que certains modèles peuvent faire apparaître *a posteriori* des limites, lorsqu'ils se sont adaptés à la conception à l'absence d'un certain type de données qui devient plus tard disponible. Cet enjeu est d'autant plus prégnant qu'on observe, en lien avec l'évolution des capacités de calcul et surtout de constitution et de manipulation de très grosses bases de données, un foisonnement très important des données disponibles ;
- ainsi, du point de vue du périmètre, il ressort notamment que l'écart observé en termes de traitement des différents segments du parc bâti reflète en partie au moins un état d'accès aux données nécessaires. En l'occurrence, l'absence de données est un obstacle évident au développement d'une démarche calculatoire sur les autres bâtiments que résidentiels et tertiaires, le secteur tertiaire étant lui-même plus difficile à modéliser que le secteur résidentiel du fait d'une moindre qualité des données, en particulier à l'échelle des branches et plus particulièrement pour certaines d'entre elles. Une amélioration de la qualité de modélisation du secteur tertiaire, qu'il semble prioritaire d'amener au même niveau que celle du résidentiel, passe donc par une amélioration des données ;
- de la même manière, c'est notamment du fait que les données utilisées en métropole n'y sont pas directement transposables, et que les données correspondant aux catégories manipulées par les modèles n'y sont pas disponibles avec le même degré de qualité ou de désagrégation, que les territoires d'outre-mer sont en général moins bien couverts ;

- dans le registre des mécaniques de modélisation, la multiplication des outils procédant d'une agrégation « bottom-up » est une richesse. Elle soutient en particulier une bonne variété d'approche du point de vue des objectifs de calcul, entre simulation par différentes approches, optimisation et aide à la décision. Des modèles abordent notamment des problématiques proches sur des périmètres similaires avec des méthodes différentes, apportant par la même une diversité de perspectives. On peut toutefois regretter qu'aucun modèle ne soit construit pour évaluer directement des enjeux de robustesse ou de résilience ;
- on peut d'autant plus regretter, en regard de cette diversité, la relative concentration des efforts de modélisation sur quelques enjeux, mesurée par exemple dans le fait que la principale interaction couverte dans les modèles eux-mêmes est celle du bouclage en énergie, plutôt que des bouclages avec l'industrie sur les matériaux, ou des bouclages sur les conditions économiques spécifiques de mise en œuvre de la transition du secteur bâtiment ;
- du côté des impacts calculés, la consommation d'énergie en phase d'usage, les émissions de gaz à effet de serre (GES en scope 1 & 2 et dans une moindre mesure les matériaux sont bien couverts. En ce qui concerne les usages de l'énergie, l'atelier a permis toutefois de noter que si la climatisation est certes présente dans les modèles, données nécessaires pour alimenter ces derniers sur ce point restent peu disponibles. L'atelier a également permis de suggérer que la dimension GES soit systématiquement traitée dès lors que l'énergie l'est, ce qui n'est pas le cas alors que le lien entre les deux est relativement simple à établir ; le souhait a de plus été émis que la modélisation des émissions de GES au scope 3 devienne relativement systématique ;
- les limites rencontrées dans les modes calculatoires ou dans l'accès à des données exploitables peuvent expliquer l'absence de modélisation des impacts relatifs à la biodiversité, ce qui n'interdit pas de pousser la réflexion dans ce domaine. Elles n'expliquent pas en revanche la faiblesse de l'écosystème de modélisation sur l'évaluation de l'artificialisation des sols, et l'absence de capacité d'évaluation des impacts sur l'eau. Sur l'une comme l'autre, cette évaluation semble en effet atteignable par le même type de méthode calculatoire reposant sur l'explicitation physique, la désagrégation et la simulation que déploient pour l'énergie nombre de modèles. De même, les ateliers ont conduit à souligner que des enjeux comme l'autonomie ou la résilience énergétique du bâti (végétalisation, autoconsommation énergétique...) pourraient être mieux couverts ;
- la faiblesse de modélisation des impacts socio-économiques, au-delà du sujet spécifique et bien identifié de la précarité énergétique et d'indicateurs économiques classiques qui ne sont pas propres au secteur du bâtiment, relève également au moins autant d'un déficit de développement des outils dans cette direction que de difficultés méthodologiques plus fondamentales. Par exemple, la capacité à saisir des impacts en termes de pollution, dont témoignent certains modèles, devrait pouvoir être corrélée à des indicateurs d'impact sur la santé. Un des progrès importants et jugés atteignables qu'ont pointés les discussions complémentaires en atelier porte sur la nécessité d'éclairer les enjeux de justice sociale : il s'agit notamment de développer dans les modèles concernés une approche distributive, permettant de mieux évaluer la répartition des efforts et des bénéfices, en lien avec une meilleure prise en compte dans les modèles adaptés de politiques ciblées ;
- enfin, un point important concerne la territorialisation infranationale, et la nécessité de développer la capacité des modèles à articuler dans une vision agrégée à l'échelle nationale des modélisations au plus près de l'échelle des territoires, voire à une maille encore plus fine. D'une manière générale, les ateliers ont pointé l'intérêt, pour améliorer la couverture des calculs attendus par les modèles et leur qualité, d'aller vers des mailles plus fines dans la qualité descriptive des modèles, que ce soit en termes géographique, démographique ou sectoriel.

5.3.3. Synthèse

La cartographie « Outils et modèles » témoigne avant tout d'une grande richesse de modélisation. Elle montre que, dans l'ensemble, il existe une réelle diversité de modèles, mais une dispersion limitée.

En ce qui concerne le **périmètre**, certaines zones sont particulièrement bien couvertes par l'écosystème existant, d'autres non. Par exemple, les secteurs résidentiel et tertiaire sont couverts par de nombreux modèles, là où au contraire, d'autres bâtiments (industriels, agricoles, logistiques) sont moins (ou pas) documentés : cela rend par exemple difficile de documenter l'impact du développement du commerce électronique ou de la consommation d'acier pour les bâtiments (car les bâtiments industriels dépendent fortement de l'acier). Du point de vue temporel, 2050 reste l'**horizon principal**, très peu de modèles permettant de se projeter plus loin (par exemple, à 2070), ce qui pose la question de la capacité à penser

les trajectoires de transformation au-delà de 2050. La territorialisation infranationale est peu couverte et les territoires d'outre-mer sont moins bien représentés. Enfin, les questions de construction et de rénovation sont très présentes, alors que la gestion immobilière semble absente.

En ce qui concerne la **méthode de calcul**, les modèles présentent une bonne variété d'approches. En particulier, par exemple, la rénovation des logements est couverte par des modèles aux philosophies de modélisation différentes, que ce soit à base d'agents, d'optimisation globale, d'approche ingénieur, etc. Cela permet une analyse approfondie du sujet et évite de tomber dans les biais associés à chacune des approches (par exemple, les modèles économétriques à base d'agents sont généralement basés sur l'analyse économétrique de données historiques, ce qui rend difficile la projection du changement, là où les modèles basés sur une simulation ingénieurs projettent plus facilement le changement et l'atteinte des objectifs, mais laissent entière la question des conditions de leur mise en œuvre). La plupart des modèles sont basés sur une agrégation ascendante, mais certains d'entre eux suivent une approche descendante, et quelques uns développent des approches hybrides. Là encore, cette diversité est intéressante car elle permet à l'ensemble de l'écosystème de ne pas s'enfermer dans les biais bien documentés de l'une ou l'autre approche : en effet, les modèles descendants pêchent en général dans leur capacité à représenter l'impact des nouvelles technologies et des changements perturbateurs, car ils manquent de la granularité nécessaire, alors que les modèles ascendants ont une difficulté à prendre en compte les effets de rebond plus larges.

En ce qui concerne, enfin, **les impacts**, la consommation d'énergie en phase d'utilisation, les courbes de charge électrique, les émissions de GES en scope 1 & 2 et les matériaux sont bien couverts. Cela ne semble pas propre au développement des modèles en France, ce commentaire faisant écho à la conclusion de la revue internationale réalisée par Mastrucci et al (2023), qui note que les modèles du secteur du bâtiment se sont largement concentrés sur l'évaluation de l'énergie en exploitation, et souligne qu'un nombre croissant de modèles prennent en compte les aspects matériels. En particulier, les modèles ascendants basés sur une approche ingénierie sont de plus en plus combinés avec des méthodes issues de l'écologie industrielle, telles que l'évaluation du cycle de vie et l'analyse des flux de matériaux, pour évaluer toutes les étapes du cycle de vie du bâtiment, la dynamique de rotation des stocks et les aspects matériels. Si ces aspects de la modélisation progressent, il faut toutefois souligner qu'au-delà, les enjeux environnementaux tels que la consommation d'eau ou la biodiversité restent très peu abordés, et que plus généralement les questions économiques et sociales sont comparativement beaucoup moins couvertes.

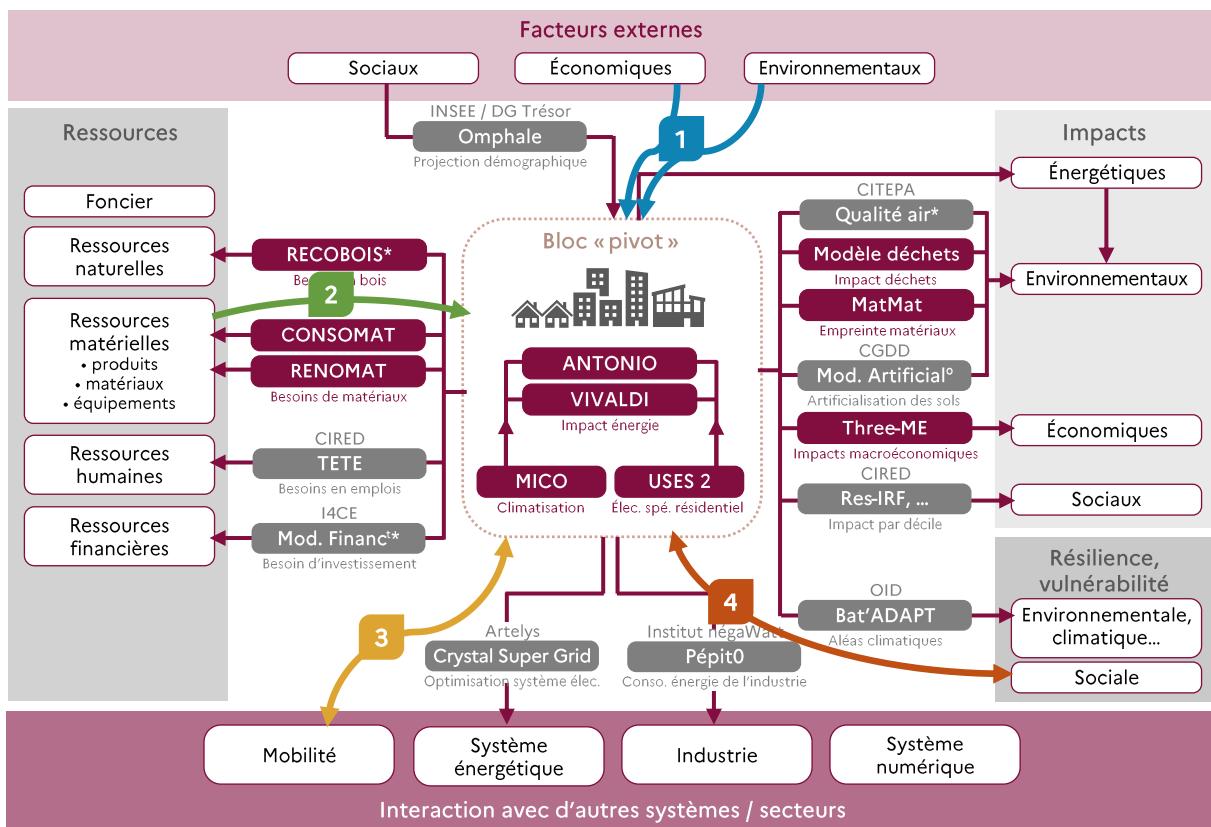
5.4. Cartographie « Chaînages et couplages »

Comme indiqué précédemment, cette quatrième cartographie est plus difficile à matérialiser, dans la mesure où elles se concentre sur la caractérisation de liens entre les différents outils et modèles, alors même que ceux-ci ne sont pas construits de manière systématique. Elle a, d'une certaine manière, plus à révéler dans ce qu'elle ne peut pas montrer que dans l'analyse des liens qu'elle permet d'identifier. C'est pourquoi le choix proposé pour l'analyse de cette cartographie a consisté, plutôt qu'à trouver une représentation globale comme pour les cartographies précédentes, à se concentrer pour l'illustration de la démarche sur l'analyse des chaînages et couplages mis en place par l'ADEME, avant d'essayer d'en tirer des enseignements plus généraux.

5.4.1. Résultats

Ainsi, la figure 16 permet de faire apparaître sur le schéma des nombreux modèles et outils mobilisés par l'ADEME et de leurs liens quelques besoins supplémentaires, tels que l'analyse des questions et enjeux, et celle des forces et faiblesses des approches de modélisation permettent de les identifier.

Il faut souligner avant d'en préciser la nature que l'écosystème ainsi présenté n'est pas fermé, au contraire. Tout d'abord, il est constitué d'une combinaison de modèles, ou d'outils, développés en propre par l'ADEME (ou développés par des tiers pour elle) et de modèles développés avec son soutien pour répondre à ses besoins, mais qui restent portés par d'autres acteurs, et de modèles développés pour d'autres besoins dont elle est simplement cliente. Ensuite, un grand nombre de ces modèles fait l'objet d'utilisations partagées, ou d'autres applications : certains des modèles construits par l'ADEME sont mobilisés par la DGEC, d'autres modèles de tiers sont utilisés par les deux, d'autres modèles encore, en accès ouvert, font l'objet de nombreuses autres utilisations par des acteurs divers. Ainsi, les besoins complémentaires qui peuvent apparaître sont moins liés à une limitation de l'accès de l'ADEME aux capacités correspondantes qu'à une lacune dans leur mobilisation, voire dans leur développement.



* Modèles non traités dans le cadre de la présente étude.

Nom Modèle ADEME Nom Modèle apporté par un autre porteur

1 chaînage avec des données d'entrée **2** rebouclage du chaînage pour intégrer les interactions
3 bouclage intersectoriel avec un autre système de modélisation **4** besoin de bouclage mais absence de modèle

Figure 16 – Cartographie des chaînages et bouclages d'outils réalisés par l'ADEME pour l'exercice Transition(s) 2050, et identification de chaînages ou bouclages potentiellement manquants

Ceci étant posé, l'analyse des combinaisons de modèles mises en place par l'ADEME pour projeter les trajectoires de transition écologique du secteur du bâtiment en tenant compte des facteurs externes, de l'interaction avec d'autres secteurs ou systèmes, des ressources mobilisées et des impacts générés permet d'identifier quatre types de besoins non couverts en termes de chaînages et de bouclages :

- le premier concerne le **chaînage avec des données d'entrée** renforçant le lien avec des facteurs externes : comme de nombreux autres outils étudiés, la modélisation développée par l'ADEME tire, pour son bloc central, des données relatives aux évolutions démographiques du modèle **Omphale**, pratiquement le seul disponible pour cela. Elle n'intègre en revanche pas d'autres données d'entrée liant à des facteurs externes de nature économique ou environnementale. On pourrait imaginer qu'un chaînage avec des modèles économiques, ou par exemple des modèles d'évolution climatique, fournisse à ce niveau une base commune à l'ensemble du dispositif de modélisation ;
- le deuxième besoin porte sur la nécessité de mieux prendre en compte le lien des trajectoires projetées avec les ressources en assurant un **rebouclage du chaînage existant pour intégrer les interactions**. Concrètement, dans l'architecture actuelle, différents modèles interrogent, à partir des trajectoires construites dans le bloc central, les besoins en ressources de différente nature. En revanche, aucun bouclage intégré dans ces modèles, ou aucun outil dédié à cela ne permet d'ajuster en retour les trajectoires du parc bâti pour tenir compte de la disponibilité des ressources en regard des besoins ;
- le point suivant a trait à des situations identifiées d'absence de **bouclage intersectoriel avec un autre système**, et sa modélisation. En l'espèce, il apparaît clairement que le besoin de modélisation de l'articulation entre trajectoire du secteur bâtiment et trajectoire du secteur transports n'est pas assuré. Si certains effets peuvent être traités « manuellement » en ajustant de façon croisée les hypothèses et résultats des modèles couvrant ces deux secteurs, par exemple tels qu'ils résultent de chaque côté de l'introduction d'une hypothèse de développement du télétravail, il est clair qu'une prise en compte

correcte de l'ensemble des effets passe par une modélisation intégrée, c'est-à-dire par un bouclage, qui est possible en principe puisque les modèles de chaque secteur existent ;

- enfin, le quatrième besoin type correspond justement à l'identification d'un **besoin de bouclage**, mais **en l'absence de modèle**. C'est par exemple le cas pour ce qui concerne une meilleure prise en compte des enjeux de vulnérabilité sociale et d'adaptation, pour lesquels l'ADEME n'identifie pas d'outils susceptibles de répondre aux questionnements.

5.4.2. Analyse

Bien qu'ils soient spécifiques à l'écosystème particulier constitué par l'ADEME, ces besoins établissent une typologie qui ne lui est pas propre. La mise en évidence de ces manques permet en fait à chaque porteur et utilisateur de modèles de se poser, vis-à-vis de sa propre pratique, des questions similaires ; elle apporte aussi, à l'échelle de l'ensemble de l'écosystème analysé dans l'étude, des éléments pour réfléchir aux réponses que pourraient apporter les chaînages et bouclages d'outils existants aux faiblesses identifiées au fil des trois cartographies précédentes. En d'autres termes, cet exemple apporte l'illustration nécessaire pour capitaliser collectivement sur des expériences dispersées.

Ainsi, si l'on tente de généraliser le questionnement construit sur la base du cas de l'ADEME, l'analyse et les retours des participants à l'atelier permettent de mettre en lumière les points suivants :

- tout d'abord, on observe, à travers les montages organisés par l'ADEME ou la DGEC ou dans le cadre de combinaisons au cas par cas, de nombreuses interactions entre modèles, mais elles restent peu structurées à l'échelle de l'ensemble de la communauté ;
- par voie de conséquence, des sujets restent mal couverts voire non traités. Parmi eux, on peut notamment relever la nécessité d'établir davantage de liens avec des communautés de modélisation autre que celle du bâtiment, par exemple vers d'autres secteurs de transition comme la mobilité, ou vers d'autres communautés comme sur les questions d'évolution du climat. En particulier, les participants à l'atelier ont cité les sujets d'interaction suivants comme d'intérêt pour la suite des travaux de modélisation prospective du bâtiment :
 - **bâtiment – mobilité résidentielle** : globalement, les modèles n'interrogent pas la fréquence et la motivation des changements de logement, et leur lien avec des conditions associées à la transition. Il s'agit notamment ici d'interroger l'impact de l'offre de transport sur la mobilité résidentielle, le lien entre localisation de l'habitat et de l'emploi, le lien avec des modèles de prix immobiliers, de disponibilité des logements ou d'équipements des territoires, l'articulation avec les projections spatio-temporelles de la population (notamment en regard des projections climatiques) ;
 - **bâtiment – transports du quotidien (personnes et marchandises)** : cette articulation, pourtant essentielle sous l'angle des modes de vie, est peu travaillée. Elle inclut par exemple l'impact de l'évolution de l'offre de transport sur la mobilité quotidienne, l'impact de la construction sur la demande de mobilité, l'impact du télétravail... Il s'agit de sujets sur lesquels des modèles d'analyse d'impact peuvent être repérés, mais ils opèrent à l'échelle locale ou à celle du projet urbain (UrbaGES, UrbaPrint) et ne sont pas utilisables à une échelle territoriale suffisamment large, et encore moins nationale, qui plus est dans une visée de prospective normative ;
 - **changement climatique** : l'enjeu identifié sur ce point est de renforcer l'articulation des modèles appliqués à la prospective de la transition du secteur bâtiment (et plus largement) avec les projections climatiques dessinant les tendances à moyen et long termes, et leur traduction en termes de variété des conditions météorologiques ;
 - **enjeux de disponibilité des ressources au sens large** : alors que la question de la mobilisation des ressources au bon niveau et au bon rythme est clairement identifiée comme une condition première de la réalisation des trajectoires de transition projetées par les modèles, cette articulation reste très faible en matière de chaînage. Il s'agit d'informer les modèles calculant ces trajectoires par une modélisation des besoins en ressources matérielles (matériaux et équipements), des besoins fonciers, des besoins en investissement, rapportés aux ressources financières disponibles et mobilisables par les acteurs du bâtiment, ou encore des besoins en emplois, avec la description du tissu d'entreprises, les besoins par corps de métier, et par exemple la prise en compte du temps incompressible de recrutement et de formation de la main d'œuvre à l'échelle des bassins d'emploi, comme le permet ECLORE. Sur ces différents points, lorsque des modèles existent, les chaînages correspondants ne sont pas systématisés ;
 - **insertion de la modélisation du bâtiment dans d'autres modélisations** sur des sujets plus larges : si les trajectoires de transition du secteur du bâtiment obéissent à de nombreux facteurs prospectifs, elles

exercent aussi nécessairement en retour une influence sur certains de ces facteurs, qui peuvent être abordés dans une perspective plus large. C'est dans ce cas les modèles du bâtiment qui pourraient faire l'objet d'un chaînage avec d'autres modèles auxquels ils fourniraient des données d'entrée. Un exemple concerne la possibilité de développer une modélisation des biens et services du quotidien, qui inclurait les équipements électriques et électroniques utilisés dans les bâtiments, ou l'insertion du secteur bâtiment dans des modélisations de type Material Flow Analysis ou calcul d'empreinte matière ou carbone à l'échelle française, avec des outils de type **Matmat** ;

- **enjeux sociaux** : bien que le sujet soit largement identifié et qu'il soit ciblé par certains modèles, l'interaction entre trajectoire du bâtiment pour la transition et précarité énergétique ne semble pas faire l'objet de chaînages entre outils, alors que l'articulation de modèles décrivant la trajectoire physique avec des modèles caractérisant le budget des ménages, par exemple, permettrait de mieux intégrer ces liens. Plus largement, les liens entre les coûts de l'énergie et l'action des ménages et des entreprises, qui ont besoin d'être mieux caractérisés, pourraient probablement l'être par le recours à des chaînages entre outils existants ;
 - **enjeux économiques** : il en va de même pour certains enjeux économiques. Il s'agit en particulier ici de l'interaction entre les trajectoires de transition décrites du point de vue du bâtiment, et leur traduction du point de vue immobilier. Les chaînages et bouclages entre modèles devraient permettre de mieux caractériser des points sensibles comme l'interaction entre le volume de rénovation et le coût de rénovation (quel équilibre entre des économies d'échelle ou une montée des prix du fait de goulots d'étranglement ?), l'interaction avec le marché immobilier (par exemple, quel impact aurait une obligation de rénovation sur le parc locatif privé), ou encore l'impact du vieillissement de la population sur les besoins en bâtiment et sur les stratégies immobilières des ménages.
- au-delà de ces points spécifiquement identifiés, les acteurs de l'écosystème de modélisation mobilisés dans le cadre de l'étude convergent pour considérer cette démarche d'intégration très utile, en soulignant notamment deux bénéfices du point de vue de la qualité prospective :
 - tout d'abord, cette démarche permet **une approche plus systémique de la transition**. Les participants en atelier ont notamment souligné que le chaînage et bouclage de modèles peut permettre de générer des indicateurs de suivi de la dynamique de transition. Par ailleurs, le bouclage entre des modèles de nature différente peut permettre d'analyser plus finement les **impacts et rétroactions**, comme on peut par exemple l'attendre de l'articulation de modèles top-down macroéconomiques et de modèles bottom-up sur les interactions liées aux prix de l'énergie ;
 - la combinaison des outils renforce également la **mise en perspective de multiples facettes de chaque sujet**, qui est nécessaire pour éclairer la décision publique. Cela n'est toutefois possible qu'à condition de créer les articulations nécessaires pour que les modèles se répondent, afin d'être en capacité d'explorer et d'interpréter les résultats, y compris en menant à l'interface entre les outils des analyses de sensibilité ou des contrôles de cohérence ;
 - parallèlement à ces attentes, les réflexions soulèvent toutefois également **des questions sur l'objectif à assigner à l'enchaînement des modèles** : jusqu'où pousser l'intégration des modèles en regard des bénéfices attendus ? D'un côté, cela peut répondre à une démarche d'amélioration des trajectoires, en recherchant à travers l'articulation des outils une capacité d'optimisation multicritères. Mais de l'autre, une telle démarche pourrait aller contre la diversité des approches de modélisation, qui est reconnue comme une richesse.

En complément de ces perspectives ouvertes sur l'intérêt au fond d'un développement organisé des chaînages et bouclages entre modèles, l'analyse et les échanges permettent également des constats sur les points d'appui et les obstacles pratiques à la mise en œuvre de cette intégration :

- en premier lieu, il faut souligner que **les possibilités d'articuler des outils manipulant de façon complexe des masses importantes de données s'accélèrent**. Ces dimensions n'ont pas été spécifiquement creusées dans le cadre de l'étude, mais les perspectives liées à l'évolution de la disponibilité des données, incarnée par la mise en œuvre de la Base de données nationales du bâtiment (BDNB) et d'autres démarches plus ciblées, et des capacités de calcul, avec le développement de l'intelligence artificielle (IA) ou des modèles à grandes échelles (comme Mines Smart-E) ouvre des perspectives nouvelles – à condition de maîtriser la qualité de leur contenu et la cohérence de leur fonctionnement, ce qui est une gageure face à leur complexité foisonnante ;
- en contrepoint, on distingue aisément **de nombreux obstacles et plusieurs limites** au renforcement de l'intégration des modèles. Celles-ci concernent par exemple l'absence de données sur certains volet,

qui pourrait cependant progresser⁷. Le retour d'expérience de certains travaux de chaînage met également en évidence le caractère nécessairement chronophage ce ces démarches (celui-ci est par exemple identifié, dans l'écosystème de modélisation de l'ADEME, comme le principal obstacle à l'articulation des outils entre bâtiment et mobilité, dont l'intérêt avait été bien identifié) ;

- d'un point de vue méthodologique, les démarches de chaînage ou de couplage se heurtent également en pratique à la **difficulté à faire dialoguer des modèles conçus séparément**, qui nécessite une harmonisation, ou a minima une interface opérationnelle entre les unités fonctionnelles, le niveau de détail, l'échelle géographique ou le pas de temps mobilisés par les différents outils ;
- par ailleurs, il faut avoir conscience que si la combinaison d'outils apporte des éclairages plus riches, elle porte aussi clairement le **risque d'un empilement des incertitudes ou des biais des modèles**. Celui-ci n'est pas facile à caractériser, et encore moins à lever sans un travail méthodologique dédié, qui peut se heurter aux difficultés pointées ci-dessus ;
- enfin, le chaînage ou l'interfaçage d'outils existants n'apporte pas de réponse là où c'est l'absence même de modèle, ou la difficulté à modéliser certaines dimensions qui est en cause, comme cela semble par exemple le cas sur l'ensemble des enjeux de résilience ou de robustesse face aux crises ;
- en regard de ces difficultés, le partage des retours d'expérience permet d'envisager quelques **conditions de faisabilité** :
 - il convient d'abord, à la base de pouvoir s'appuyer sur une **méthodologie commune** à une communauté de modélisateurs. Elle peut s'appuyer sur la philosophie de l'open source, et se concentrer sur quelques enjeux pointés par l'analyse ci-dessus : la simplification des liens entre modèles avec des outputs/inputs un peu plus standardisés, permettant de formaliser des chaînages automatiques, l'utilisation de jeux de données communs, ou encore l'introduction de spécifications communes lors du développement des différents modèles ;
 - la capacité d'intégration des modèles existants pourrait également, à l'instar de démarches d'intercomparaison ou d'interfaçage déployées sur les modèles à l'échelle internationale⁸ sur le **développement d'outils dédiés**. On pourrait par exemple envisager la mise en place de « modules » open source pour éviter de redévelopper les mêmes briques logicielles, la mise à disposition partagée de versions simplifiées des modèles, des « toy models » qui permettent des premiers couplages plus légers et exploratoires, la création de dashboards communs fondés sur des indicateurs permettant de faire dialoguer les modèles et de les comparer ;
 - ces approches peuvent demander d'accepter de dézoomer pour utiliser des modèles plus complexes mais pas plus détaillés ;
 - enfin, cette intégration peut appeler de la part des modèles « pivots » (à l'image de ceux que l'ADEME place au centre de son appareillage de modélisation) la production de chiffres plus détaillés pour nourrir des analyses qui doivent dépasser les valeurs moyennes, comme le montre par exemple le constat sur la nécessité d'aller dans une modélisation par catégories pour mieux éclairer les impacts sociaux.
- l'ensemble de ces constats appelle, pour finir, à une réflexion sur la nécessité pragmatique de s'appuyer sur **des stratégies intermédiaires**. Cela pourrait consister à se limiter, lorsque un besoin de chaînage ou de bouclage est identifié, à l'articulation la plus « légère » possible pour ne pas trop contraindre ou alourdir les modèles, en se concentrant par exemple sur la production d'indicateurs à l'interface de chaque modèle et le couplage a minima des paramètres d'entrée des modèles pour s'assurer que leurs productions sont cohérentes entre elles. Pour les enjeux tels que bâtiment et mobilité, bâtiment et artificialisation, une autre piste est de procéder par agrégation de modèles régionaux qui font déjà le lien entre ce type de sujets.

⁷ Ce point n'a pas été discuté dans le cadre de l'étude, mais la limite observée sur les données détaillées relatives à l'utilisation des matériaux pourrait par exemple être au moins en partie levée avec la mise en œuvre du Récapitulatif standardisé des études énergétiques et environnementales (RSEE) pour les analyses en cycle de vie concernant les bâtiments neufs.

⁸ On peut notamment citer ici les démarches mises en œuvre par la communauté des modélisateurs des évolutions climatiques, ou les approches développées dans certains projets internationaux pour standardiser ou comparer des trajectoires de transition énergétique produites par différents modèles (projet Deep decarbonisation pathways mené par l'IDDR, scénario collaboratif européen CLEVER coordonné par l'Association négaWatt, projet de recherche EDITS coordonné par l'IISIA et le RETI, etc.)

5.4.3. Synthèse

À partir de l'analyse de la cartographie « Chaînages et bouclages » des modèles de l'ADEME, les réflexions menées sur les besoins ou potentiels des différents outils analysés et le partage en ateliers permettent de tirer quelques enseignements généraux.

L'exemple de l'écosystème de modélisation mis en place par l'ADEME illustre la possibilité de nombreuses interactions entre les modèles, ce qui permet une approche plus systémique de la transition. Dans cet exemple, les deux principaux modèles (pivots) qui calculent la consommation d'énergie dans les secteurs résidentiel et tertiaire alimentent une variété de modèles supplémentaires qui documentent d'autres dimensions de la transition. Par exemple, les sorties concernant le nombre de nouveaux bâtiments et leurs modes constructifs alimentent des modèles qui documentent l'énergie nécessaire dans le secteur industriel pour produire des matériaux et des équipements ou l'occupation des sols. Les résultats sur le niveau d'activité dans le secteur du bâtiment (généré par les activités de construction et de rénovation) alimentent des modèles économiques qui calculent soit les besoins en emploi par une approche ascendante (modèle **TETE**), soit la croissance économique par une approche macroéconomique (modèle **ThreeME**). Cependant, si les chaînages sont nombreux, les bouclages sont encore balbutiants : il reste dès lors difficile de définir une stratégie de transition robuste qui tiendrait compte des boucles de rétroaction (par exemple, faut-il adapter la stratégie de rénovation – et si oui, comment – si le marché du travail n'est pas en mesure de former les gens assez rapidement ?).

Ce cas concret montre aussi comment l'écosystème s'appuie ou pourrait s'appuyer sur des modèles pour documenter l'évolution de l'environnement général des bâtiments (évolution du climat, de la démographie...) qui ne sont pas spécifiques au secteur du bâtiment. La capacité de l'écosystème de modélisation des bâtiments à intégrer des évolutions économiques, sociales ou environnementales plus larges dépend donc d'autres communautés de modélisation. Par exemple, tous les modèles s'appuient sur des scénarios de projections démographiques conçus par l'INSEE, mais aucun de ces scénarios n'intègre une augmentation potentielle des migrations due, par exemple, au changement climatique. Par conséquent, aucun organisme de la communauté française de modélisation n'intègre un tel scénario.

Une réflexion systématique sur les liens du bâtiment avec l'organisation territoriale, la politique du logement, les secteurs du transport et de l'industrie est nécessaire pour améliorer les liens avec des outils existants en dehors de la sphère « bâtiment ».

Les entretiens avec les développeurs et les opérateurs de modèles ont mis en évidence l'intérêt d'une démarche plus structurée d'intégration des différents modèles existants, mais aussi pointé les obstacles et les limites associés à un tel exercice de chaînage et de bouclage. Parmi ceux-ci, on peut notamment relever la difficulté de relier des modèles conçus séparément (qui mobilisent des unités fonctionnelles, un niveau de détail, des échelles géographiques et des pas de temps potentiellement différents, etc.), le risque méthodologique d'accumuler les incertitudes ou les biais des modèles à mesure que les modèles pivots deviennent centraux, ou la nature chronophage d'un tel processus de chaînage ou de bouclage.

Les discussions au cours de l'atelier ont enfin soulevé des questions plus ouvertes. Par exemple, jusqu'où l'intégration des modèles doit-elle être poussée en ce qui concerne les avantages attendus, et pour quel objectif ? En particulier, la question se pose de l'équilibre entre une forme de capacité d'optimisation multicritères produite par cette intégration, et la nécessité de préserver, voire de renforcer la richesse que constitue la diversité d'approche des modèles. Il y a aussi le risque que le développement d'un écosystème de modélisation plus complexe sur la base des outils existants mobilise des ressources aux dépens de nouveaux développements méthodologiques visant à couvrir des dimensions qui semblent par nature trop difficiles à modéliser avec ces outils, comme la résilience sociale aux crises.

5.5. Synthèse globale

L'analyse des quatre cartographies montre que l'écosystème français de la modélisation, fort d'un développement parfois foisonnant, dispose d'atouts majeurs pour contribuer à l'élaboration prospective de parcours de transition pour le secteur du bâtiment, parmi lesquels :

- l'existence d'un très grand nombre de modèles et d'organismes impliqués dans la modélisation,
- la mobilisation d'une grande diversité d'approches, particulièrement marquée sur des sujets clés comme la rénovation des logements, qui permet de les éclairer sous de multiples facettes,
- une caractérisation fine, voire très fine, du parc immobilier dans certaines de ses dimensions (typologie, localisation, etc.), notamment dans le secteur résidentiel,

- un large corpus de modèles technico-explicites, construits selon une approche bottom-up et donc bien adaptés à l'exploration des trajectoires ainsi qu'à l'évolution permanente des outils.

Dans l'ensemble, donc, l'analyse de l'écosystème de modélisation étudié témoigne d'une très bonne capacité à simuler et à explorer en détail le rôle du secteur du bâtiment dans la transition énergie/carbone, en particulier sous l'angle de la contrainte d'atteinte des objectifs climatiques, et de certaines dimensions des conditions de mise en œuvre des trajectoires correspondantes pour le secteur.

Toutefois, l'analyse met parallèlement en évidence des faiblesses, voire des lacunes, pointant les domaines dans lesquels il convient de poursuivre le développement si l'on veut que l'écosystème de modélisation contribue pleinement à optimiser les stratégies de transition et à documenter ses multiples dimensions. En particulier :

- certaines dimensions environnementales sont encore très peu documentées, comme la question de la consommation d'eau ou l'enjeu des impacts sur la biodiversité, ou de façon très fragile, comme celles de l'adaptation au changement climatique ou de l'occupation des sols, qui ne semblent reposer chacune en l'état que sur un seul modèle, ce qui soulève des questions quant à la dépendance à l'égard des biais inévitables de ces modèles ;
- certains bâtiments sont moins bien documentés, voire pas du tout : le résidentiel est de loin le secteur le mieux couvert, le tertiaire l'est également bien mais avec une disparité, et quelques branches moins bien traitées, les bâtiments agricoles et industriels sont pour leur part très mal couverts ;
- au-delà, il existe encore un large éventail de facteurs et de questions de prospective qui sont mal ou pas du tout couverts. En particulier, la question de savoir comment les voies de transition peuvent être résistantes aux crises constitue un défi méthodologique clé pour les modèles qui fonctionnent tous selon une logique plutôt continuiste. En outre, une meilleure intégration de la dynamique des marchés immobiliers améliorerait considérablement la capacité à représenter les stratégies des acteurs ;
- enfin, la prise en compte de la diversité sociale, économique ou territoriale reste un défi. Les modèles tendent, dans la mesure où ils se concentrent souvent sur les dimensions physiques des trajectoires de transition (bâtiments, équipements, ressources...), à moins bien appréhender les dynamiques sociales, l'hétérogénéité des comportements d'acteurs, et l'évolution des différents contextes économiques, sociaux et institutionnels, et leur diversité locale. Il est dans ces conditions difficile d'élaborer des récits suffisamment complets et cohérents sur la transition auquel les différents acteurs (ménages, entreprises, autorités locales, etc.) puissent se référer.

6. Vers une communauté de la prospective du bâtiment et de l'immobilier ?

À l'occasion de cette étude, l'ADEME a souhaité offrir un espace de rencontre entre les différents modélisateurs. Parmi les intentions il y avait l'idée de débattre de l'intérêt d'un renforcement du dialogue entre modélisateurs, dans l'idée que les différentes structures puissent se faire une idée des perspectives de coopération envisageables.

En complément des focus qui ont pu être faits sur ces aspects lors de l'analyse individuelle des modèles et des entretiens, trois questions ont été posées à l'ensemble des participants en atelier :

- Quelles seraient les modalités possibles d'une communauté de prospective bâtiment & immobilier ?
- Quels seraient les avantages ?
- Quels seraient les freins ?

On restitue ci-après les principaux éléments de réponse tirés de ces échanges sur l'état des lieux, les bénéfices envisagés et les freins, avant d'esquisser les possibles modalités d'une coopération plus intense et structurée.

6.1. État des lieux

L'impression globale qui ressort de l'ensemble des échanges menés bilatéralement ou collectivement dans le cadre de l'étude est que la communauté formée par les développeurs et les opérateurs de modèles liés à la transition du secteur du bâtiment est dans **une posture générale de coopération, mais avec peu de régularité et de cadre dans les échanges**.

La tenue des entretiens individuels puis des ateliers collectifs a fait ressortir un intérêt unanime à connaître les travaux menés par les autres structures, et des postures majoritairement ouverte au principe de coopérations. Il semblerait que de manière générale, les modélisateurs échangent de façon occasionnelle avec un ou deux autres porteurs de modèle, mais que les situations d'échanges plus nombreux ou plus collectifs soient rares. À titre d'illustration, parmi les personnes réunies en atelier, environ une personne sur quatre ne connaissait aucun des autres participants.

Deux types de communautés existantes ont toutefois été identifiées :

- le premier s'organise plutôt autour d'un outil, lui-même déclinable dans différents contextes, à l'image de la communauté internationale IMACLIM dans laquelle s'inscrit le CIRED ;
- le second se structure au contraire autour d'un besoin commun mobilisant plusieurs outils, ce qui est le cas des communautés de modélisateurs structurées en leur sein par des organismes comme le CSTB d'une part, et l'ADEME d'autre part.

En dehors de ces trois exemples, aucun groupe de travail pérenne et transverse n'a été identifié. Ces éléments conduisent à constater qu'aujourd'hui le niveau d'échange tient davantage de démarches individuelles que de pratiques de travail structurelles.

Parmi les enjeux en commun, on a pu identifier également la nécessité de préserver les compétences dans le temps long. Les travaux reposent parfois, dans les services de l'État ou dans des laboratoires de recherche, sur deux ou trois personnes, ce qui est fragile. Il y a un intérêt commun à réfléchir aux moyens de construire de la pérennité, quelque chose qui dure et s'entretient, en s'appuyant potentiellement davantage sur une logique de communauté.

Enfin, dans un autre registre, une préoccupation s'est également manifestée sur la volonté de travailler davantage en open source (science ouverte) pour faciliter les échanges et les mutualisations.

6.2. Bénéfices potentiels

Les échanges ont mis en évidence de nombreux moteurs individuel et collectifs pouvant jouer un rôle significatif en faveur du rapprochement des acteurs. Le partage en atelier a permis de clarifier, préciser et renforcer certains éléments captés dans les échanges bilatéraux. Voici les différents avantages attendus par les acteurs interrogés :

- Amélioration de la robustesse de la modélisation : parmi les progrès attendus sur ce plan sont cités la possibilité de démultiplier l'usage des bases de données et de projections qui sont diffusées et rendues

disponibles aujourd’hui (exemple des projections Omphale de l’INSEE, avec une entrée « climats futurs contrastés »), ou l’idée de faire dialoguer plus facilement des hypothèses alternatives sur un même sujet, et de disposer par là même d’une comparabilité des études suffisante pour en renforcer les conclusions. Une plus grande coopération est également de nature à renforcer la capacité de lecture critique des résultats, et la compréhension des manques et des incertitudes. Elle permet enfin, en générant un contexte de test par d’autres acteurs que les concepteurs des modèles, dans des situations qu’ils n’ont pas prévues, une identification plus complète et plus rapide des éventuels « bugs » méthodologiques ;

- **Amélioration de la complétude et de la finesse** de la modélisation : l’idée principale ici est clairement d’étendre le périmètre d’évaluation d’impact, en amont et en aval, des trajectoires modélisées, sur des sujets d’intérêt commun tels que les enjeux matériaux, l’économie, l’impact du climat. Une pratique renforcée d’échanges peut également conduire à mutualiser les « listes de course » relatives aux données à collecter et aux études à réaliser, lorsque ces besoins sont communs. Enfin, un enjeu collectif est clairement formulé autour de la nécessité faire reboucler de plus en plus d’impacts pour en intégrer les contraintes, les seuils de contraintes devant eux-mêmes être modélisés afin de permettre le rebouclage(disponibilité de ressources par exemple) ;
- **Gain en matière de pérennité** : sur ce point, un premier avantage perçu important est de tenter de sécuriser des situations de fragilité de certaines capacités de modélisation, qui ne reposent que sur deux ou trois, voire une seule personne dans une structure. De façon moins ciblée, il est attendu que la coopération permette une acculturation plus rapide ou profonde des nouveaux arrivants à l’écosystème existant de modélisation (au-delà donc des outils et modèles portés par leur structure d’accueil) ;
- **Gain en matière d’efficacité**, économie de ressources : l’un des principaux intérêts de la coopération pourrait être de réduire les redondances, en permettant aux modélisation de réutiliser tout ou partie des moyens de modélisation et des bases de données existants plutôt que de les redévelopper. Cette option est également perçue comme un moyen de faire remonter plus rapidement les bugs des modèles. Parallèlement à cette utilisation mutualisée de l’existant, il s’agit aussi de partager les efforts concernant la constitution de base de données, l’élaboration de méthode ou l’évolution des modèles ;
- **Renforcement de la capacité d’influence** : plusieurs aspects pourraient contribuer de façon complémentaire à cet objectif. Le premier est d’améliorer, grâce à un portage et une vision mieux partagés, la lisibilité des recommandations issues de la modélisation prospective et, lorsque c’est pertinent, de permettre à des développeurs différents de porter ensemble des messages. Le deuxième est de renforcer la crédibilité des scénarios et conclusions produits par cette modélisation, en particulier dans des perspectives académique et internationale. Enfin, la coopération est un moyen de croiser les visions stratégiques développées par les porteurs de scénarios, pour apporter collectivement des réponses plus complètes et cohérentes aux préoccupations des uns et des autres.

6.3. Freins perçus

En miroir du moteur que peuvent constituer ces bénéfices attendus, les entretiens et ateliers ont néanmoins naturellement aussi mis en évidence un certain nombre de freins :

- **Complexité de conception et de portage des projets collaboratifs** : le développement concret d’articulations entre les outils et modèles considérés revêt nécessairement, compte tenu de leur nature et de leur richesse descriptive et calculatoire, une certaine complexité. Parmi les obstacles pratiques, on peut mentionner l’hétérogénéité des échelles de travail, la difficulté de coordination technique de collaborations complexes, ou la mobilisation nécessaire de profils rares. Des problèmes peuvent également survenir de l’utilisation de langages informatiques différents, ou des possibilités d’usage en conformité avec le droit relatif à la protection des données ;
- **Risques techniques** : compte tenu de cette complexité et des difficultés relevées sur la compatibilité des modèles en termes de périmètre et de principes descriptifs et calculatoires, les articulations entre outils peuvent s’avérer plus difficiles qu’il n’y paraît au premier abord, générant potentiellement des échecs ou des erreurs. Par ailleurs, l’intégration des modèles engendre un risque d’empilement des biais et des degrés d’imprécision qui doit faire l’objet d’une attention particulière pour être maîtrisé ;
- **Volume des ressources humaines et financières nécessaires** : ce risque constitue un frein majeur, dans un contexte où les ressources dont disposent les organismes pour développer leurs outils, voire simplement parfois pour en maintenir le portage, sont limitées. Parmi les sujets identifiés, on peut identifier le volume des développements nécessaires pour non seulement rendre comparables les résultats, mais permettre d’aller plus loin en créant les passerelles nécessaires entre outils, qu’il faut de

plus entretenir (risque qu'elles deviennent obsolètes lorsque des modifications sont apportées à l'un et/ou l'autre des outils). Dans un registre différent, on peut relever que l'accès aux bases de données ou aux modèles commercialisés a un coût, de même que le financement de la mise en accès libre d'outils de ce type, coûteux à développer. Enfin, la piste consistant à développer en mode plus participatif des outils partagés robustes est elle aussi de nature à générer des coûts significatifs, associés à la nécessité d'assurer une coordination complexe, une documentation précise et partageable, un design d'usage et une formation des utilisateurs suffisants, etc.

- **Freins relatifs aux stratégies des structures**: enfin, de manière évidente, s'agissant de structures au statut et aux enjeux différents, y compris sur le plan commercial pour certaines d'entre elles, la perspective d'une coopération renforcée doit trouver une limite respectueuse des intérêts de chaque membre de la communauté de modélisation. On peut identifier dans ce champ deux types de difficultés :

- les premières touchent aux écarts de positionnement : cela concerne d'abord l'hétérogénéité des objectifs ou les priorités divergentes en termes de résultats dont sont porteuses les structures en fonction de leur rôle dans l'écosystème. Il faut bien sûr également tenir compte d'enjeux de concurrence d'image ou de positionnement entre acteurs, voire de concurrence commerciale – et de ce point de vue, la diversité des méthodes est perçue comme un bénéfice car elle renforce la robustesse ;
- les secondes portent sur le modèle économique des structures : on peut d'une part souligner que le budget propre disponible pour de la recherche et du développement est souvent plus faible chez les acteurs privés que chez une partie au moins des acteurs publics. Par ailleurs, la perspective d'un passage en open source pose, pour différents acteurs, question par rapport aux modèles économiques qui ont prévalu pour les développements passés.

6.4. Possibles modalités d'une communauté et projets de collaboration

Ces différents freins et obstacles doivent évidemment être pleinement pris en compte. Ils ne semblent toutefois pas remettre en cause, aux yeux des membres de la communauté des modélisateurs interrogés dans le cadre de l'étude, l'intérêt général pour une coopération renforcée. Au regard des avantages potentiels d'une communauté de prospective, les différentes contributions ont permis d'identifier plusieurs modalités possibles de renforcement des pratiques de coopération. Celles-ci portent d'abord sur les possibilités de plus grande structuration et régularité des échanges :

- **Échanges**: premièrement, l'organisation de rencontres récurrentes (trimestrielles ou annuelles) est proposée, ainsi que la création d'une plateforme d'échange sur les pratiques et les hypothèses prospectives. Parmi les objectifs explicités ressortent les points suivants :
 - les besoins exprimés de façon récurrentes dans ce domaine sont de disposer ainsi d'un partage d'actualité sur les créations ou évolutions de modèles, et d'un espace de confrontation des approches méthodologiques ;
 - les porteurs de modèles identifient en particulier l'intérêt d'un partage de l'analyse des données d'observation (par exemple sur le tertiaire), s'appuyant sur les données ouvertes publiques existantes (par exemple présentes sur Datagouv), d'un échange sur les hypothèses prospectives, ou encore d'un partage des difficultés et retours d'expérience ;
 - plus largement, certains acteurs projettent une mise en commun de méthodologies, données et hypothèses (sur le modèle des pratiques observées, dans un champ proche, sur le portail cartographique des énergies renouvelables).
- **Groupes de travail** : deuxièmement, l'animation de groupes de travail est proposée autour de plusieurs objectifs. Ces intentions, plus ou moins ambitieuses, peuvent être résumées comme suit :
 - la construction d'une nomenclature commune, impliquant notamment un travail sur les éléments de vocabulaire en vue d'aligner les définitions des objets entrants ou sortants des modèles. Il s'agitait par exemple de se donner une définition commune de ce qu'on entend par sobriété au sens de la modélisation et de s'accorder sur la manière dont cette dernière peut être représentée dans les modèles ;
 - la proposition de formats harmonisés de rendus des études (format des modèles, documentation, hypothèses, etc.), afin notamment de mieux pouvoir comparer plus directement entre eux les résultats des différentes études ;

- l'élaboration d'une méthodologie partagée de bouclages intersectoriels, en particulier pour ceux qui sont peu ou ne sont pas pris en compte actuellement ;
- l'accord à trouver sur un formalisme de données, à l'image de la démarche proposée à l'international par pyam, outil basé sur le langage Python favorisant l'analyse et la visualisation de scénarios énergie et climat construits sur des modèles complexes⁹ ;

Ensuite, les échanges permettent de préciser ce que pourraient être **des espaces de coopération sur des projets communs**. Dans ce domaine, les perspectives tournent d'abord autour de la constitution de bases de données communes, dont la présente étude témoigne de l'intérêt, mais qui n'entre pas dans son champ. Au-delà, plusieurs possibilités de collaboration opérationnelle sont identifiées pour renforcer les modélisations :

- **Intégration des modèles** : l'idée d'une sorte de macro-modèle unique qui s'incrémenterait au fil du temps est très majoritairement écartée par les acteurs interrogés, cependant plusieurs projets opérationnels moins intégrés sont proposés. Au regard des freins évoqué précédemment, les idées sont placées dans un ordre de complexité croissant :
 - le développement et l'usage de **modules communs open source** sur la base de modèles existants (par exemple, pour la prospective sur l'évolution de la population). Par module, on entend ici un périmètre de fonctionnalité circonscrites ;
 - le développement d'**émulateurs de modèles existants**. Ces émulateurs ont vocation à permettre des exécutions rapides et standardisées de modèles complexes (reproduction du fonctionnement sans exécution du calcul) ;
 - la mise en place de **fonctions d'appel de modèles existants** afin d'organiser des modélisations plus complexe, et plus largement la recherche d'une structure permettant de faire coexister plusieurs modèles informatiques différents ;
 - le développement open source d'**outils d'analyse et de visualisation** des inputs/outputs (comme le package pyam, déjà évoqué) ;
 - à un stade plus avancé encore, l'élaboration d'une **feuille de route commune** en termes de développements et d'interfaçages.
- **Développement de modèles communs simplifiés**, avec l'objectif de se doter d'un langage commun, et d'une base avec laquelle chacun des modèles plus élaborés portés par les acteurs pourrait dialoguer ;
- **Mise en place de projets communs de modélisation prospective** rassemblant plusieurs équipes, sans que l'on n'approfondisse toutefois dans le cadre de la discussion le périmètre, les modalités et le portage de tels projets.

6.5. Analyse et conclusions

Cette section vise à identifier les stratégies de modélisation qui seraient les plus à même de mobiliser les acteurs, au regard des avantages et des freins évoqués. Cette analyse nécessiterait d'être mise en perspective selon l'acteur qui pourrait s'en saisir afin de faire émerger les bénéfices d'un travail communautaire autour de la modélisation de l'immobilier et du bâtiment, mais cette question n'a pas été abordée dans le cadre de l'étude..

En tout état de cause, la mobilisation des structures sera facilitée par l'effet levier de stratégie s'appuyant sur les avantages perçus. Les points d'intérêt identifiés pour encourager cette dynamique sont :

- de **s'appuyer sur les questionnements identifiés et portés par une majorité d'acteurs**, ces priorités communes étant plus à même de mobiliser la masse critique nécessaire de développeurs et de porteurs de modèles pour engager les développements envisagés ;
- de **chercher à faire émerger des projets là où les besoins de couplage semblent le plus nécessaires**, c'est-à-dire là où une structure seule aurait du mal à réunir les capacités nécessaires. Par exemple, un des sujets évoqué est le travail sur les évolutions des comportements engendrées par l'adaptation au changement climatique : aucun acteur ne semble en mesure de capter facilement tous les champs nécessaires à un tel développement de la modélisation, mais cela peut être envisageable à plusieurs ;

⁹Cet outil, signalé dans le cadre des ateliers, n'a toutefois pas été analysé dans le cadre de l'étude. Voir la page de documentation de l'outil : [pyam: analysis and visualization of integrated-assessment & macro-energy scenarios](https://pyam-iamc.readthedocs.io/en/stable/index.html) <https://pyam-iamc.readthedocs.io/en/stable/index.html>

- de privilégier d'abord l'articulation et l'hybridation d'outils existants, dans la mesure où du point de vue du modèle économique, il semble y avoir davantage de potentiel dans le développement d'accès ou de passage en open source de modèles existants plutôt qu'au développement de nouvelles méthodes.

Pour progresser dans la réflexion et dans la structuration de l'écosystème des acteurs de la modélisation du secteur bâtiment et immobilier en communauté, capable d'envisager concrètement par la suite ce type de développement, trois modalités sont mises en avant :

- l'instauration d'un **espace régulier de rencontre**: cette proposition s'appuie sur le constat que les interactions ayant eu lieu dans le cadre de cette étude ont été relativement simples à mettre en œuvre, et que les espaces d'échange ainsi créés ont semblé appréciés. L'intérêt que présentent ces espaces d'interconnaissance, l'énergie qu'ils procurent semble constituer une réelle source de motivation pour les participants. C'est un temps qui permet à une partie au moins de « s'inspirer mutuellement » et « se sentir moins seul » face aux préoccupations partagées ;
- le travail sur une **nomenclature commune** : cela a été le sujet de travail le plus plébiscité et il semble le moins coûteux au regard des ressources à mettre en œuvre ;
- le développement de **modules communs simples** en open source, dont les modalités n'ont pas vraiment été exploitées mais qui rencontre un intérêt très partagé.

7. Conclusion et recommandations

L'analyse de l'écosystème français de modélisation des bâtiments montre que les modèles représentant le lien énergie-bâtiment constituent l'épine dorsale de l'écosystème et permettent de capturer un large éventail de défis techniques et économiques (électrification, création d'emplois...), ainsi qu'un ensemble émergent de modèles axés sur les ressources et la demande de matières premières. Toutefois, l'étude met clairement en évidence la nécessité de poursuivre les développements. Certains, tels que les variations dans les projections démographiques, les projections au-delà de 2050... ne nécessitent que des ajustements mineurs pour que les modèles les prennent en compte. D'autres nécessiteraient un développement plus important, par exemple pour intégrer un plus large éventail d'impacts environnementaux, ou pour introduire des boucles de rétroaction entre les modèles afin de mieux refléter l'interaction entre la demande et l'offre (emplois, ressources...). Enfin, la communauté des modélisateurs doit renforcer sa capacité à contribuer à la réflexion sur la résilience face aux crises ou aux grandes tendances sociales et économiques (numérisation, évolution des marchés immobiliers...).

L'analyse permet de formuler trois séries de recommandations pour l'écosystème français de la modélisation, qui peuvent également s'appliquer à d'autres communautés nationales :

- **Consolider ou à approfondir les éléments déjà couverts par le processus de modélisation.** Il peut s'agir, par exemple, d'organiser un dialogue entre les outils et modèles existants (convergence ou interfaçage des unités fonctionnelles, intégration plus systématique de tous les leviers identifiés), d'améliorer le couplage et le bouclage des outils existants lorsque cela semble facile à mettre en œuvre, de mieux couvrir le parc immobilier ou d'aller au-delà de la barrière de 2050.
- **Renforcement de certaines dimensions de la modélisation, qui semblent mal couvertes aujourd'hui mais pour lesquelles une meilleure couverture semble techniquement réalisable.** Il s'agit, par exemple, de remédier au manque apparent de capacité de modélisation dans le secteur immobilier (changements dans les services immobiliers, valeurs immobilières, etc.), de développer des modèles capables de traiter un niveau plus élevé de diversité sociale ou territoriale, ou de prendre en compte des impacts quantifiables qui ne sont pas encore couverts (par exemple, la gestion de l'eau) ou qui sont mal intégrés (par exemple, les impacts sur la santé).
- **La troisième série de recommandations concerne des questions plus ouvertes, dont la modélisation reste largement à développer dans le cadre d'une approche prospective plus large.** Il s'agit par exemple de coupler les approches entre la réduction de l'impact climatique (bien couverte), la consommation de matériaux (relativement couverte) et l'eau et la biodiversité (à couvrir), ou de renforcer la capacité des modèles à refléter les chocs internes ou externes prévisibles sur les données d'entrée qu'ils utilisent (démographiques, économiques, climatiques...).

ANNEXE – FICHES

Les 45 fiches présentées dans cette annexe (dont 3 portent sur deux modèles, soit qu'il s'agisse de documenter une transition en cours entre deux versions relevant de la même approche – A6, A7 –, soit de tracer l'existence d'un module d'extension spécifique – A10) rassemblent, selon un format standardisé, l'information collectée et l'analyse menée sur chacun des outils et modèles étudiés.

Il convient de souligner, au préalable, que le même format de questionnement et de synthèse est ici appliqué à des situations d'une grande hétérogénéité, du point de vue de la nature des outils eux-mêmes comme du degré de prise d'information et d'analyse dont ils pu faire l'objet dans le cadre de l'étude.

Ainsi, malgré cette volonté de standardisation, ces fiches restent hétérogènes dans leur forme en lien avec la diversité des outils mais aussi dans leur volume : en fonction du caractère plus ou moins pertinent du détail (en lien avec la « distance » entre l'outil considéré et l'objet de l'étude) et/ou des conditions de collecte de l'information, on s'est par exemple davantage intéressé à la vision d'ensemble qu'au détail de chaque outil lors des entretiens avec les porteurs de plusieurs outils.

Chaque fiche de synthèse se divise en deux, et parfois trois parties :

- un tableau récapitulatif basé sur le compte-rendu de la prise d'information, fiche rédigée à partir d'une connaissance acquise par la pratique ou par la lecture de l'outil considéré, ou dans la majorité des cas sur la base de l'entretien avec des porteurs de cet outil ;
- un tableau de positionnement du modèle ou de l'outil par rapport aux principaux déterminants de chacune des quatre cartographies qui fait ressortir, sans mener une analyse exhaustive, les points saillants tirés de la caractérisation de chaque outil vis-à-vis de ces quatre angles de problématisation ;
- dans certains cas, une vue synoptique graphique, sur une page, des principales informations relatives au modèle. Là encore, sans viser à l'exhaustivité, il s'agit de rendre compte, pour une sélection d'outils suffisamment divers, de la manière dont il peut être caractérisé par la grille d'analyse multidimensionnelle que constituent les quatre cartographies.

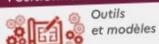
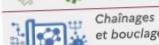
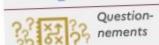
Bien que certaines fiches fassent l'objet d'un compte-rendu très informatif, le contenu de chaque fiche n'est pas nécessairement complet, dans la mesure notamment où tous les aspects n'ont pas pu être abordés lors des entretiens (ceux-ci ont été menés de façon relativement libre, à partir d'une grille mais sans structure rigoureusement préétablie) et où les compléments apportés par les rédacteurs se limitent à des enrichissements, sans apporter de nouveaux éléments de discussion ; a fortiori s'agissant des outils et modèles pour lesquels la fiche s'est uniquement basée sur des lectures documentaires. Par ailleurs, l'objectif n'est en tout état de cause pas de qualifier chaque modèle ou outil vis-à-vis de l'ensemble des aspects traités dans le rapport, mais d'en permettre une compréhension globale pour en faire ressortir les principaux points d'intérêt et de questionnement.

Fiche détaillée

La fiche détaillée est établie sur la base d'un entretien avec des représentants du ou des organismes porteurs du projet, ou d'une restitution d'information par les auteurs de l'étude dans le cas de modèles qui leur sont suffisamment familiers. Elle est complétée par des éléments tirés de la documentation disponible ou de croisement d'information avec l'examen d'autres modèles.

Volontairement construite selon une trame suffisamment souple pour s'adapter à la diversité des modèles et entretiens dont elle restitue le contenu, elle se divise essentiellement en quatre parties :

- le résumé des informations sur le modèle traité, et des conditions de constitution de la fiche (contacts, date de l'entretien, ressources éventuelles...);
- des éléments descriptifs relatifs à l'usage et aux différentes caractéristiques de l'outil, déclinés le cas échéant pour un ou plusieurs modules spécifiques d'intérêt à l'intérieur de l'outil;
- des éléments plus réflexifs sur les spécificités, forces et faiblesses et perspectives de développement utiles ou possibles de l'outil ;
- des indications sur le positionnement du modèle vis-à-vis des quatre approches cartographiques retenues, tel qu'il apparaît à l'issue de l'analyse.

Outil		résumé	
Modèle / outil	Nom modèle		
Porteur(s)	Nom porteur		
Développeur(s)			
Interlocuteur(s) et ressources			
Contact(s)	Prénom NOM Fonction, structure	prenom.nom@structure.com	
Prise d'information	Entretien conduit le -/-/2023. Fiche validée le -/-/2023.		
Ressources			
Modèle général			
Finalité			
Type d'outil			
Champ de modélisation			
Usage type / périodicité			
Architecture			
Rythme d'actualisation			
Périmètre technique	Bâtiments Usages Population		
Périmètre géograph.	Échelle Territoire		
Périmètre temporel	Horizon Pas temporel		
Principes de calcul			
Entrées			
Sorties			
Détail			
Module spécifique	Nom module		
Périmètre technique	Bâtiments Usages Population		
Périmètre géograph.	Échelle Territoire		
Périmètre temporel	Horizon Pas temporel		
Principes de calcul			
Entrées			
Sorties			
Éléments de discussion			
Points forts			
Lacunes / développement			
Besoins identifiés	Données Méthode		
Positionnement dans la cartographie			
 Outils et modèles			
 Champs et paramètres			
 Chaînages et bouclages			
 Questionnements			
Commentaires			

Nom du modèle, porteur et résumé

Contact(s) et conditions d'établissement de la fiche

Eléments descriptifs relatifs à l'origine et la finalité de l'outil, au périmètre et au principe de calcul du modèle, avec ses entrées et sorties

Le cas échéant, éléments descriptifs de même nature sur des modules d'intérêt spécifique (un par module)

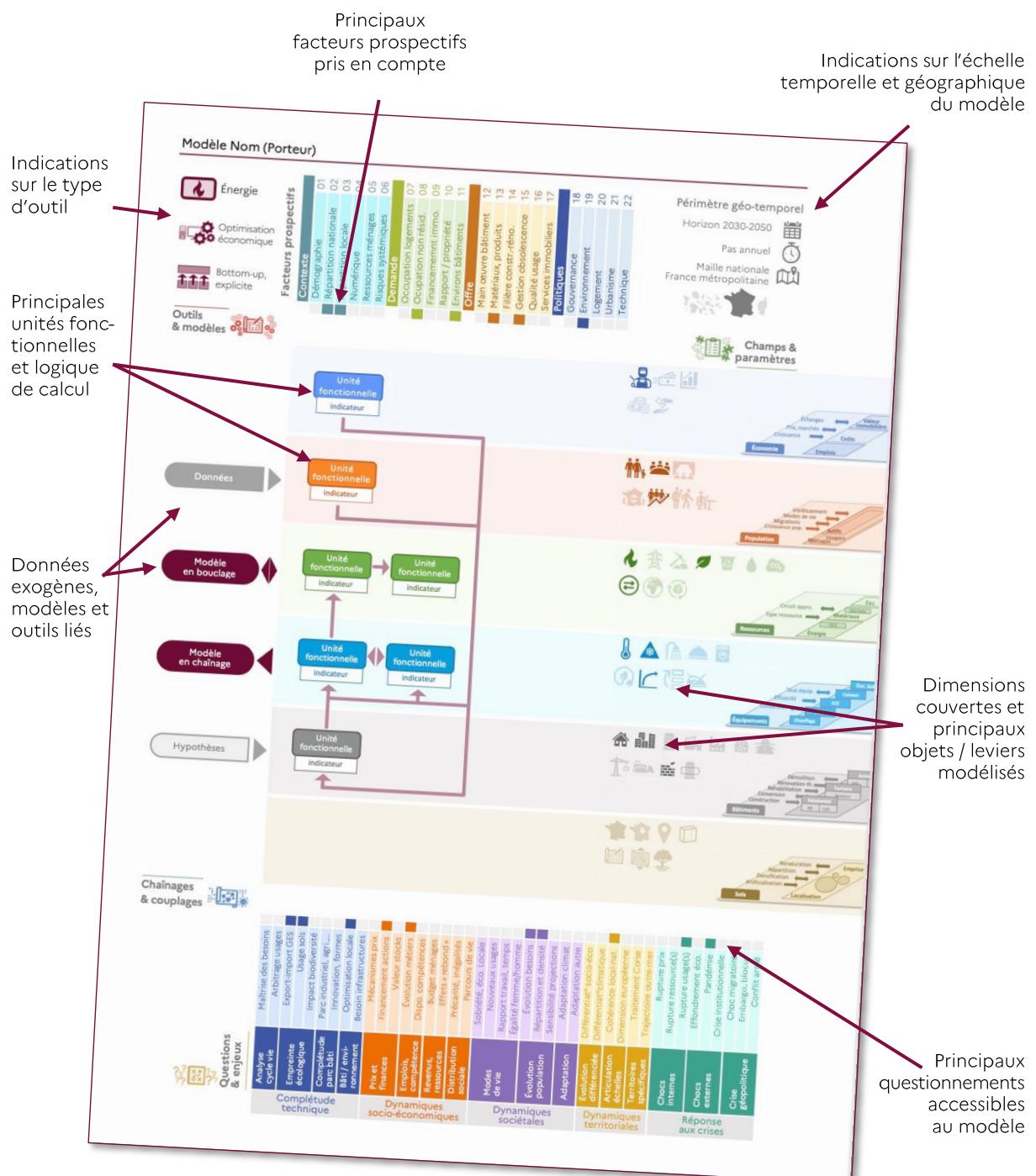
Eléments de réflexion sur les limites et développements possibles

Synthèse du positionnement du modèle vis-à-vis des quatre cartographies

Vue synoptique

Pour une sélection de fiches, une vue synoptique est proposée. Elle rassemble, sous une forme ramassée et standardisée pour tous les modèles, les principales informations relatives à la nature, au fonctionnement et au positionnement sur les quatre cartographies de chacun des outils. Cette information, rassemblée à l'issue de l'analyse des modèles, est inévitablement réductrice, en regard de leur diversité et de leur hétérogénéité, et dans une certaine mesure subjective(via les choix sur la manière de représenter les différents aspects de chacun des outils).

Un jeu d'icônes et de codes graphiques, détaillé page suivante, permet de résumer les principales caractéristiques du modèle du point de vue de la typologie des outils (champ principal, type de modélisation, facteurs prospectifs qu'il intègre de façon prioritaire, périmètre temporel et géographique...), de la cartographie des dimensions et paramètres (objets et leviers pris en compte, chaîne logique de modélisation...), des chaînages et bouclages (données d'entrée et modèles liés), et des principaux questionnements d'intérêt qu'il est susceptible de traiter.



La caractérisation générale du modèle comporte trois indications, relatives respectivement à l'objet principal visé par la modélisation, au type de modélisation mis en œuvre et à la nature de l'agrégation ou désagrégation sur laquelle elle s'appuie.

Objet principal		Énergie		Matériaux		Bâtiment		Population		Économie
Type d'outil, fonction		Simulation prédictive (prévision)		Simulation exploratoire (prospective)		Optimisation (efficience)		Aide à la décision		
Logique d'agrégation		Bottom-up, technico explicite ou implicite		Top-down, technico explicite ou implicite		Mixte, technico explicite ou implicite				

D'autres icônes permettent de repérer rapidement les indications sur le périmètre temporel et géographique du modèle, ainsi que le pas de temps et la maille territoriale auxquels il travaille.

Échelle du modèle		Horizon		Pas de temps		Maille territoriale
Territoire couvert		France entière		France métropolitaine		France continentale

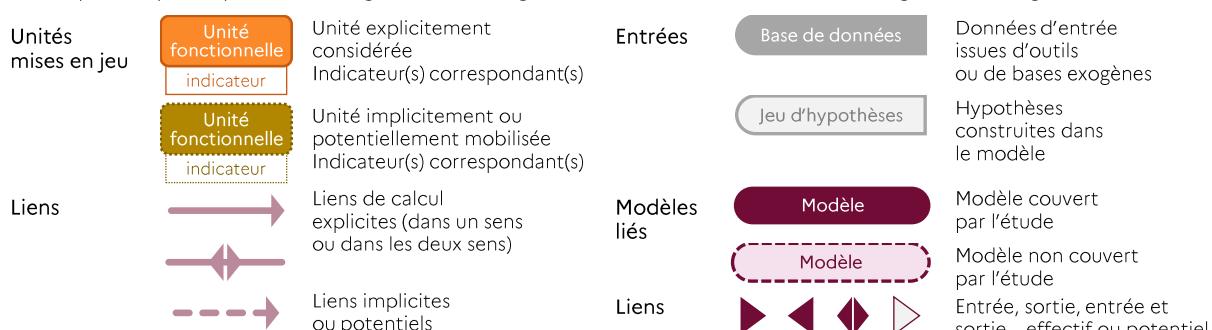
	Territoires d'outre-mer
--	-------------------------

Dans la section relative aux paramètres couverts par le modèle, différentes icônes apparaissent dans chacune des dimensions considérées, pour indiquer selon qu'elles apparaissent en plein ou en grisé les principaux objets et leviers dont se saisit le modèle.

Sols	Bâtiments	Équipements	Ressources	Population	Économie	
Objets, stocks et flux	national territorial localisation emprise	maison individuelle logement collectif tertiaire public tertiaire privé industrie agriculture infrastructures	chauffage climatisation eau chaude sanitaire cuisson électricité spécifique	énergie électricité ⁽¹⁾ matières premières biomasse ⁽²⁾ déchets eau gaz à effet de serre pollution	ménages population active usagers	emplois coûts valeur des stocks
Leviers, actions	urbanisme changement d'usage artificialisation, renaturation	construction démolition rénovation reconversion mutualisation	conversion efficacité dimensionnement usage réparation	substitution import export circularité	migrations croissance démographique pyramide des âges modes de vie	investissements marchés

(1) Périmètre spécifiquement limité à l'électricité; (2) Périmètre spécifique biomasse.

Le fonctionnement du modèle est ensuite schématisé par l'identification des principales unités fonctionnelles qu'il mobilise dans chacune des dimensions, de façon pleinement explicite ou plus implicite, en précisant si possible le ou les indicateurs associé(s), puis des principaux liens qu'il établit entre elles (sans chercher à préciser la nature de ces liens au-delà de leur ordre logique). Les principaux inputs ainsi que les principaux chaînages et bouclages avec d'autres modèles sont également figurés.



A1. ANTONIO (ADEME)

Outil		
Modèle / outil	ANTONIO	
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	Énergies Demain, Enerdata, I Care & Consult, et POUGET Consultants.	Ce modèle fournit, avec un niveau de désagrégation très fin, une projection de l'ensemble des consommations d'énergie dans les résidences principales, qui a notamment servi dans le cadre de Transition(s) 2050 et en fait le pivot de la modélisation du bâtiment de l'ADEME.
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Albane GASPARD Animatrice du secteur prospective du bâtiment et de l'immobilier - ADEME	albane.gaspard@ademe.fr
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 22/02/2023 Revue et complétée par les auteurs le 31/10/2023. Fiche validée le 08/08/2024.	
Ressources	https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5749-modele-antonio-transition-ecologique-des-logements.html	
Modèle général		
Finalité	Le modèle ANTONIO (trANSiTION écologique des logements) permet de projeter à 2050, en France métropolitaine, les consommations d'énergie des différents usages dans les résidences principales. Il s'appuie également sur un module permettant de faire évoluer la composition du parc de logements. Il est complété par un module d'analyse de cycle de vie (ACV) qui calcule l'impact environnemental du flux d'équipements modélisé.	
Type d'outil	Il s'agit d'un outil technico-explicite de simulation de la trajectoire énergétique du secteur résidentiel et des émissions de gaz à effet de serre associées, basé sur une approche « bottom-up » d'agrégation des consommations des logements.	
Champ de modélisation	Le modèle porte spécifiquement sur la trajectoire de consommation d'énergie du secteur résidentiel.	
Usage type / périodicité	Le modèle n'a été utilisé à ce stade que dans l'exercice <i>Transition(s) 2050</i> .	
Architecture	Le modèle, développé sous Excel, est constitué d'une feuille de paramétrage et d'un moteur de calcul, qui lui-même articule différents modules, portant des étapes du calcul ou des matrices de transfert.	
Rythme d'actualisation	Le modèle a d'abord été développé par Énergies Demain, Enerdata et I Care & Consult pour les besoins d'une étude en 2019, avant de connaître quelques évolutions pour <i>Transition(s) 2050</i> . Il est mis à jour et opéré par Énergies Demain, Enerdata et POUGET Consultants pour <i>Transition(s) 2050</i> .	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle s'intéresse spécifiquement au secteur résidentiel, et ne porte que sur les résidences principales. Le parc est segmenté selon quatre caractéristiques structurantes : <ul style="list-style-type: none"> • 3 types de logement : maison individuelle, HLM collectif, autre logement collectif; • 4 périodes de construction du logement : avant 1970, 1970-2000, 2000-2015, 2015 et plus ; • 4 niveaux de performance énergétique de l'enveloppe : ces niveaux de performance sont définis à partir de seuils appliqués aux besoins thermiques conventionnels pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS) ; • 17 modes de chauffage, incluant 7 modes de chauffage collectif (réseau de chaleur urbain – RCU, gaz, fioul, électricité, gaz de pétrole liquéfié – GPL, pompe à chaleur – PAC – hybride gaz/électricité, bois), 6 modes de chauffage individuels(gaz, fioul, électricité, GPL, PAC hybride gaz/électricité, bois), 4 modes non différenciés (PAC air/air, air/eau, eau/eau, et PAC gaz).
	Usages	La décomposition de la consommation d'énergie se fait selon les usages suivants : (1) Chauffage ; (2) Eau chaude sanitaire ; (3) Usages spécifiques (inclus la cuisson) ; (4) Éclairage ; (5) Climatisation.
	Population	La population française est décrite sous forme de ménages occupant ces résidences principales, tenant compte notamment du taux de cohabitation par foyer, avec une représentation de la répartition selon différents critères des ménages dans chacun des segments du parc résidentiel.
Périmètre géograph.	Échelle	L'outil couvre la France métropolitaine.
	Territoire	Il fonctionne à la maille nationale et ne comporte pas de désagrégation territoriale.
Périmètre temporel	Horizon	L'horizon des trajectoires produites par ANTONIO est 2050.
	Pas temporel	Il fonctionne au pas de temps de 10 ans (2015-2020, puis 2020-2030, 2030-2040 et 2040-2050).
Principes de calcul	<p>Le moteur de calcul articule 7 modules spécifiques, qui se basent sur des hypothèses communes regroupées dans différents onglets de paramétrage :</p> <p>Module dynamique du parc : il est principalement composé d'un onglet permet de faire évoluer le parc de logements selon leur catégorie (résidences principales, résidences secondaires ou occasionnelles, logements vacants). Ce module permet ainsi d'explorer les leviers d'action de réinvestissement des logements secondaires ou vacants. Ce module s'inspire de la logique d'ensemble du modèle OTELO.</p> <p>Module chauffage : le module chauffage est principalement composé de 4 onglets permettant de combiner différents leviers :</p> <ul style="list-style-type: none"> • un premier onglet permet de réaliser l'ensemble des calculs sur les consommations d'énergie dues au chauffage. Cet onglet prend en compte les évolutions du parc de logement et intègre les hypothèses concernant la réhabilitation des logements et les changements de système en appelant les deux onglets présentés en suivant ; • l'onglet sur les transferts entre systèmes, composé de matrices de passage qui permettent de matérialiser l'évolution de la répartition des équipements au fil du renouvellement d'équipements ; • l'onglet sur les actions sur l'enveloppe, composé de matrices de passage qui permettent de modéliser les rénovations du bâti et l'évolution des niveaux de rénovation des logements du parc ; • un dernier onglet contient les hypothèses concernant les besoins énergétiques conventionnels pour chaque segment de logements existants et neufs, ainsi que les gains forfétaires liés aux différents niveaux de réhabilitation. 	

Module ECS: le module consacré à l'eau chaude sanitaire est composé de 2 onglets :

- le premier permet de réaliser l'ensemble des calculs sur les consommations d'énergie dues à l'eau chaude sanitaire. Il prend en compte les évolutions du parc de logement et intègre les hypothèses concernant les changements de système de chauffage en appelant l'onglet suivant;
- le second onglet est composé de deux matrices de passage. La première permet de modéliser pour chaque renouvellement d'équipement individuel l'évolution de la répartition des nouveaux équipements individuels d'ECS. A noter que les renouvellements d'équipements d'ECS combinés sont conditionnés par le renouvellement des modes de chauffage. La seconde matrice permet de modéliser les équipements ECS des logements construits.

Module climatisation: ce module comprend un seul onglet, qui permet de réaliser l'ensemble des calculs sur les consommations d'énergie dues à l'usage des systèmes de climatisation. Cet onglet prend en compte les évolutions du parc de logements et intègre les hypothèses concernant l'évolution des types de systèmes et des besoins. Ce module n'a pas été utilisé dans le cadre de *Transition(s) 2050*: à la place, les résultats du modèle **MICO** ont été intégrés directement dans **ANTONIO**.

Module électricité spécifique(équipements blancs, bruns, gris): il est composé d'un unique onglet, reprenant principalement les sorties du modèle **USES 2** jusqu'à 2030 et faisant évoluer les différents paramètres (taux d'équipement, puissance, etc.) sur la base d'hypothèses de modélisation sur la période 2030-2050. Il est conçu pour être compatible avec les sorties du modèle **USES 2** pour 2030.

Module éclairage: l'onglet éclairage fait évoluer cette consommation en lien avec différents paramètres. Il prend en compte le type de ménage et de technologies : nombre de lampes, durée d'allumage par lampe, puissance moyenne et consommation annuelle des ménages.

Module ACV : ce module permet de calculer l'impact environnemental du flux d'équipements modélisé. En l'absence de données prospective sur l'impact environnemental des équipements à 2050, il fonctionne avec l'hypothèse de base que l'impact environnemental des produits en 2050 sera identique à leur impact actuel. Le périmètre de l'ACV est du berceau à la tombe, l'unité fonctionnelle est l'utilisation d'un équipement sur sa durée de vie. Ce module n'a pas été utilisé dans le cadre de *Transition(s) 2050*.

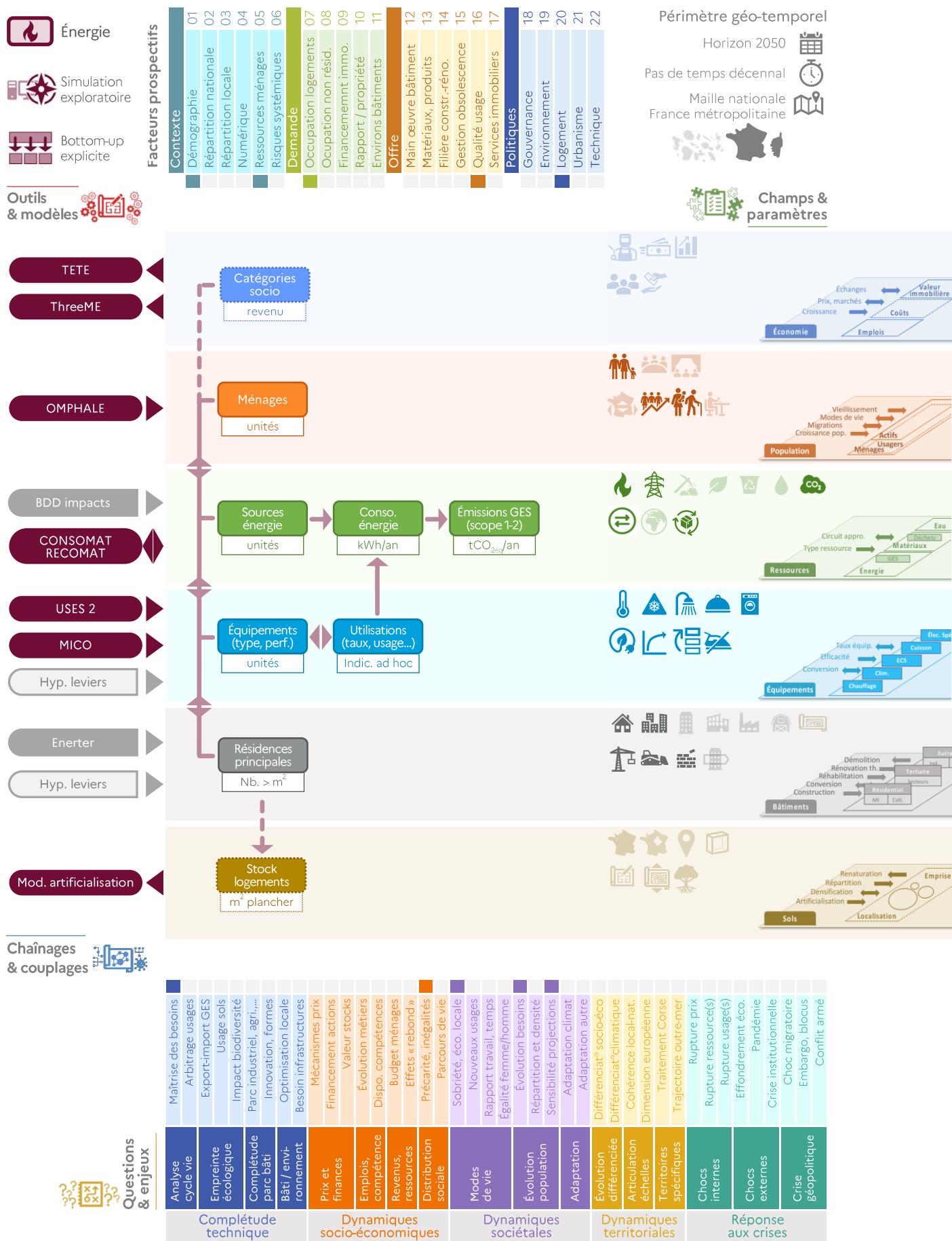
Entrées	Les principales entrées nécessaires au modèle concernent : <ul style="list-style-type: none">• les hypothèses démographiques ;• les caractéristiques des logements neufs ;• les caractéristiques des logements détruits ;• les taux et le niveau atteint en rénovation énergétique ;• les transferts entre énergie
Sorties	Les principales sorties du modèle sont la consommation d'énergie, désagrégée par usage, vecteur, type de logement, et les émissions de GES. Il fournit également, par construction, des états intermédiaires et un état final du parc de bâtiments, inclus de son niveau de rénovation, et des équipements de chauffage et d'ECS, avec leur répartition entre technologies et leur niveau de performance.

Éléments de discussion

Points forts	Par rapport aux modèles existants, l'outil intègre notamment les fonctionnalités suivantes : <ul style="list-style-type: none">• la prise en compte de tous les usages dans un unique outil intégré ;• l'intégration des chauffages d'appoint ;• la possibilité de paramétrier une sobriété contrainte sur des critères économiques ;• le lien entre les équipements de chauffage et d'eau chaude sanitaire ;• la possibilité de lier le développement du gaz naturel à la présence actuelle des réseaux et celle des réseaux de chaleur urbains à la densité urbaine ;• l'intégration d'un module d'analyse de cycle de vie permettant notamment d'estimer les consommations d'énergie grise.
Questionnements et développements	<p>Sur le plan technique, le fonctionnement du modèle sous Excel est très lourd. Un redéveloppement en Python est prévu.</p> <p>Du point de vue des fonctionnalités, l'ADEME a listé de façon détaillée les principales limites du modèle qu'elle identifie, qui sont les suivantes.</p> <p>Sur le chauffage, cet outil ne permet pas :</p> <ul style="list-style-type: none">• la modélisation des consommations des résidences secondaires et de leur évolution;• la modélisation d'impact des travaux: l'ensemble du parc de logements est décomposé selon une segmentation pour laquelle il est nécessaire de calculer au préalable les consommations initiales et l'impact des travaux de réhabilitation;• la modélisation technico-économique des travaux: les rythmes et types de gestes de rénovation et de changements de systèmes ne sont pas automatiquement calculés par l'outil notamment en fonction de leur rentabilité respective mais sont fixés par l'utilisateur. L'outil ne permet donc pas de tester l'impact de modifications des conditions économiques telles que le coût de l'énergie, le coût des travaux ou l'attribution de subventions;• l'évolution de la composition sociologique du parc: la répartition des ménages dans les logements selon la segmentation retenue est réalisée selon l'état initial du parc et de ses occupants(2015 ici), de même que la répartition des logements selon le type d'unité urbaine ou la disponibilité de l'accès au réseau gaz. L'outil ne permet pas de transférer des ménages d'un segment vers un autre, la caractérisation sociologique du parc reste donc constante(sauf si les réhabilitations sont favorisées selon le niveau de revenu, le facteur de niveau de vie du segment évoluant alors);• l'outil ne permet pas de considérer d'extension des réseaux de gaz(ou on décide dans ce cas de ne pas tenir compte de la contrainte de présence initiale du réseau).• les modes de chauffage: l'outil permet de segmenter le parc selon 17 types de chauffage ce qui limite les possibilités de détailler les systèmes de manière très précise. Ainsi par exemple pour le chauffage au bois, un seul système regroupe tous les types d'appoints quel que soit notamment le combustible utilisé(mais aussi par exemple pour les différentes performances de chaudières). Il serait cependant envisageable d'ajourner à l'outil un module complémentaire permettant de détailler les systèmes pour chaque segment;• l'outil ne permet pas en l'état la réhabilitation des logements construits après 2015. En effet un seul segment regroupant tous ces logements construits jusqu'en 2050 avec les plus performants construits après 2012 il n'existe donc pas de « classe » de performance plus élevée. Par ailleurs les

		<p>mêmes rythmes de changement de système sont appliqués à ces logements neufs qu'au reste du parc : la durée de vie moyenne dépend du système et l'âge moyen des systèmes n'est pas recalculé pour chaque segment de parc de logement, les mêmes taux de changement sont donc appliqués ;</p> <ul style="list-style-type: none"> • ceci induit donc une surestimation des changements sur le parc neuf (logiquement sans effet notable sur les performances puisque des systèmes récents sont remplacés par des systèmes neufs) ; • les consommations de chauffage globales par énergie sont calées sur les données du bilan national en 2015. Les facteurs de calages induits sont supposés représenter les incertitudes de modélisation ainsi que les écarts entre les comportements des ménages et les hypothèses conventionnelles ; • pour les projections, on suppose que les consommations réelles des logements rénovés se rapprochent des valeurs « théoriques » (un paramètre permettant cependant de tenir compte des malfaçons). Cette hypothèse, qui permet d'éviter de sous-évaluer les consommations projetées, mériterait d'être consolidée par des données spécifiques permettant de comparer les consommations théoriques et réelles dans des logements performants. <p>En complément, sur l'eau chaude sanitaire, les limites de l'outil sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'outil permet de segmenter le parc selon 8 types de systèmes de production ECS, ce qui limite les possibilités de détailler les systèmes de manière très précise. Ainsi par exemple pour la production ECS utilisant le vecteur électrique, un seul segment regroupe PACs et système Joule. L'outil calcule un rendement moyen de ce segment en fonction du nombre de chaque type de systèmes. Il serait cependant envisageable d'ajouter à l'outil un module complémentaire permettant de détailler les systèmes pour chaque segment ; • plus ponctuellement, le modèle semble sous-estimer les consommations de solaire thermique, comme constaté lors du calage sur des données 2015 du SDES. Ce point est à investiguer, en revoyant le calage, voire la paramétrisation de ces consommations au sein du modèle. <p>Enfin, pour le chauffage comme pour l'ECS, l'amélioration des rendements des systèmes est légèrement sous-estimée, et donc les consommations légèrement surestimées : en effet, pour chaque période de calcul les systèmes retirés du parc sont affectés du rendement moyen de ce parc et non d'un rendement dégradé correspondant à des systèmes sortants plus anciens.</p>
Besoins identifiés	Données	—
	Méthode	Un enjeu méthodologique spécifique concerne le besoin de mieux estimer le passage entre consommation conventionnelle et réelle.
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil énergie de simulation exploratoire à visée plutôt normative, fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite l'ensemble du secteur résidentiel (résidences principales) et couvre tous les usages de l'énergie à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050, au pas de dix ans.
	Champs et paramètres	Le modèle ANTONIO travaille essentiellement sur les trois dimensions constitutives de la consommation d'énergie des bâtiments, à savoir : <ul style="list-style-type: none"> • les bâtiments, avec un modèle de stock du parc de résidences principales, dont l'unité de traitement est le logement ; • les équipements, avec un modèle de stock détaillé des systèmes de chauffage et d'eau chaude sanitaire, et des éléments relatifs à l'ensemble des autres usages de l'énergie dans le résidentiel ; • les ressources, avec le calcul complet des consommations d'énergies associées à ces différents usages dans l'ensemble des segments du parc résidentiel considérés, et des émissions de gaz à effet de serre associées (en scope 1 et 2, voire en scope 3 via le module ACV) ; L'outil couvre également en partie la dimension population , à travers les hypothèses démographiques pilotant l'occupation et les usages, construites à l'échelle des ménages. Il ne traite pas directement la dimension économie, même s'il intègre des caractéristiques socio-économiques dans la description des ménages, et n'aborde pas du tout la dimension des sols.
	Chaînages et bouclages	Le modèle ANTONIO constitue, avec son pendant VIVALDI pour le tertiaire, le pivot de la suite d'outils mobilisés par l'ADEME pour la modélisation du secteur des bâtiments. À ce titre, il est connecté ou connectable avec de nombreux autres outils. Il est d'abord chaîné, pour les données d'entrée sur la démographie, avec le modèle Omphale. Il est par ailleurs initialement calibré sur les données d'occupation des logements par les ménages de la base de données Enerter, mais conçu pour pouvoir également utiliser d'autres données d'entrée. Le modèle s'alimente ensuite, pour atteindre une modélisation plus fine de certains usages, d'outils spécifiques : USES 2 pour l'électricité spécifique, et MICO pour la climatisation. Enfin, le modèle est ou peut être mis en relation avec de nombreux outils permettant respectivement : <ul style="list-style-type: none"> • d'informer les liens avec les besoins en ressources, qu'il s'agisse de compétences et d'emplois (TETE), d'investissements (données d'I4CE) ou de matières premières (CONSOMAT, RECOMAT) ; • de traiter les enjeux intersectoriels, par exemple avec le système électrique(via Crystal Super Grid, d'Artelys) ou l'industrie (PépitO) ; • d'évaluer différents impacts environnementaux (Modèle déchets, MatMat à l'avenir pour l'empreinte matière et carbone, Modèle artificialisation du CGDD...) ou socio-économiques(ThreeME...).
	Questions et enjeux	Du fait de son périmètre de modélisation et de la manière très technico-explicite dont il est construit, le modèle se prête assez mal, en soi, à explorer la plupart des questionnements identifiés. On peut cependant noter sa connexion avec les enjeux d'analyse en cycle de vie(via son module dédié), de lutte contre la précarité énergétique(en lien avec sa modélisation de la rénovation), ou la sobriété qui peut être explicite introduite dans le jeu d'hypothèses. Il pourrait également se prêter à des analyses de sensibilité sur l'évolution des besoins, ou sur un éventail de projections démographiques. Les différents chaînages et couplages dont il fait ou pourrait faire l'objet montrent en revanche comment un modèle de ce type fournit, par la finesse de la description technique qu'il mobilise et la nature directe et « traçable » des calculs qu'il développe, une base intéressante pour explorer, via des outils complémentaires, différents questionnements au niveau technique (par exemple sur les infrastructures de réseau), socio-économique (par exemple sur les aspects liés au budget des ménages, puisqu'il intègre ce paramètre dans son état descriptif), sociétal voire territorial (puisque il s'appuie sur une catégorisation pertinente à la maille IRIS). Il semble plus difficile, même si l'absence d'outils dans ce domaine ne permet pas d'être plus précis, de le relier à des enjeux de réponse aux crises.

ANTONIO (ADEME)



A2. CONSOMAT (ADEME)

Outil		
Modèle / outil	CONSOMAT	<i>Le modèle projette les besoins en ressources matérielles liées à la construction neuve des logements et d'une partie du secteur tertiaire à 2050</i>
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	CSTB	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Philippe LÉONARDON Coordinateur thématique - ADEME	philippe.leonardon@ademe.fr
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 22/02/2023 Fiche validée le 09/08/2024.	
Ressources	https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/439-prospectives-2035-et-2050-de-consommation-de-materiaux-pour-la-construction-neuve-et-la-renovation-energetique-bbc.html	
Modèle général		
Finalité	Consommation de matériaux liée à la construction neuve	
Type d'outil	Bottom-up	
Champ de modélisation	Le modèle porte spécifiquement sur les consommations de ressources matérielles du secteur résidentiel et d'une partie du tertiaire	
Usage type / périodicité	Modèle développé en 2019 dans le cadre d'une étude ADEME par le CSTB. Ré-utilisé tel quel pour <i>Transition(s) 2050</i> .	
Architecture	Ensemble de feuilles Excel, comprenant notamment une base de données de macrocomposants	
Rythme d'actualisation	-	
Périmètre technique	Bâtiments	Résidentiel (résidences principales, EPHAD inclus), tertiaire CHEB (commerces de grande distribution, hôtels, enseignement, bureaux). Les typologies de logement retenues sont : Maisons individuelles diffuses ; Maisons individuelles groupées ; Logements collectifs ; EHPAD.
Usages	Les consommations de matière ont été modélisées pour une vingtaine de matériaux couramment observés dans la construction en France métropolitaine. Ne prend pas en compte les équipements.	
Population	-	
Périmètre géograph.	Échelle	France métropolitaine
	Territoire	Il fonctionne à la maille nationale et ne comporte pas de désagrégation territoriale.
Périmètre temporel	Horizon	2050
	Pas temporel	Pas de temps de 10 ans
Principes de calcul	<p>Pour le secteur du logement, l'approche repose sur la représentativité de plus de 80 macrocomposants (ex : une cloison intérieure en plaques de plâtre, un mur extérieur en briques, ...); celle-ci permet de représenter finement les parts de marché des différentes solutions constructives.</p> <p>Pour le tertiaire CHEB, la modélisation repose sur la définition de 16 typologies de bâtiments représentatives d'un mode constructif couramment observé.</p> <p>Pour chacune des quatre catégories de logement, la modélisation initiale est basée sur la mobilisation de cinq principales sources de données :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les volumes de logements construits • Les morphologies des logements construits • Les parts de marchés des différents procédés constructifs • Une base de données de macrocomposants développée au CSTB, caractérisant les quantités de produits et de matière pour chacun des procédés constructifs. <p>Enfin, différentes études, notamment les études de filières, sur les volumes de matériaux ou produits de construction, sont utilisées pour vérifier la cohérence des résultats.</p> <p>Le choix méthodologique pour la modélisation du parc tertiaire CHEB repose sur la réalisation de bâtiments types. La morphologie générale (surface, nombre de niveaux, ...) de chacun des bâtiments types. La reconstitution des bâtiments types sont issus de deux approches :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de deux bases de données comportant des analyses de cycle de vie de bâtiments (Expérimentation HQE performance et Observatoire de la Performance Environnementale des Bâtiments Neufs). Ces différents bâtiments ayant été mobilisés et adaptés à la morphologie générale de chacun des bâtiments types ; • Production de maquettes numériques pour les bâtiments types non représentés dans les deux bases de données à disposition. <p>Chacune des approches permet de connaître les matériaux constituant les bâtiments types et leurs quantités associées.</p>	
Entrées	Volume de logements construits Morphologie des logements construits Part de marché des différents procédés constructifs des logements Quantité de matière par macrocomposant pour les logements Descriptif des matériaux constituant les bâtiments type dans le tertiaire	
Sorties	Quantité de matière (par type de matériau, typologie de bâtiment, par type de lot constructif)	
Éléments de discussion		
Points forts	Facile d'utilisation.	
Questionnements et développements	Concernant les développements qui permettraient de renforcer les résultats de la modélisation, nous avons identifié : <ul style="list-style-type: none"> • Étendre le périmètre du modèle tertiaire CHEB à l'ensemble du secteur tertiaire couramment comptabilisé dans les outils nationaux. L'objectif principal sera de comparer plus simplement les résultats de la modélisation avec les estimations réalisées par les différentes filières. Par ailleurs, 	

renforcer les dispositifs de remontée d'information sur le secteur tertiaire permettrait de fiabiliser les estimations de consommation de matière ;

- Développer les connaissances sur la caractérisation du parc de bâtiments tertiaires et mettre en place une caractérisation des bâtiments comparable au secteur du logement. En effet, la méthodologie développée pour le secteur du logement permet d'approcher de manière plus fine les impacts liés à l'évolution d'un système constructif particulier sans impacter l'ensemble des paramètres décrivant un bâtiment type. Cela permet aussi de séparer plus simplement les impacts liés à des modifications de morphologies des bâtiments des impacts liés à l'évolution des parts de marchés des différents systèmes constructifs ;
- Étendre le périmètre géographique aux territoires ultramarins ;
- Réaliser des analyses de sensibilité à différents paramètres, que ce soit sur les volumes (notamment : baisse importante des volumes à partir de 2035 et stabilité des surfaces par logement) ou sur les évolutions de parts de marché de systèmes constructifs complémentaires à ce qui a été intégré à cette étude. On pourrait par ailleurs développer une approche inverse en répondant à une question du type : « y a-t-il une trajectoire réaliste qui permette de maintenir la consommation d'une ressource sous un certain niveau ? ».

Concernant les développements qui permettraient d'élargir les possibilités d'utilisation de la modélisation, nous avons identifié :

- Coupler l'analyse des quantités de matière consommée par le secteur du bâtiment à une analyse sur les quantités de matière effectivement disponibles (croiser consommation de ressources et gisements, en particulier sur les matériaux les plus critiques) ;
- Intégrer une prise en compte différenciée de la matière consommée en fonction de son type : matière première secondaire recyclée ou réemployée, biosourcée/renouvelable, vierge et non renouvelable ;
- Étendre les indicateurs pris en compte (ici quantité de matière) aux indicateurs issus de l'analyse en cycle de vie ;
- Estimer les types de déchets qui seront ensuite générés afin d'identifier les filières de valorisation les plus impactantes ;
- Faire un lien avec l'empreinte matière en incluant les consommations indirectes de matière non prises en compte dans cet exercice (voir notamment « L'empreinte matières, un indicateur révélant notre consommation réelle de matières premières », Datalab Essentiel, avril 2018) ;
- Impliquer de manière plus forte les représentants des différentes filières de matériaux de construction dans le calibrage du modèle pour l'année en cours. Faute de temps, nous n'avons pas mis en place de groupe de travail impliquant les différentes fédérations représentatives des filières de matériaux de construction dans le calibrage du modèle. Cet exercice permettrait de fiabiliser, mais surtout de partager, les résultats de la modélisation et de l'envisager comme la base d'un suivi de la consommation de matière dans le secteur du bâtiment.

Besoins identifiés	Données	Disposer de données sur les modes constructifs des bâtiments (tertiaires notamment, mais également industriels ou agricoles) non inclus dans le modèle permettrait d'étendre la modélisation à d'autres bâtiments.
	Méthode	Le modèle est en cours de redéploiement en Python dans le modèle BTPFlux du CSTB.

(1) Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil de projection des besoins en ressources matérielles liées à la construction de bâtiments (matériaux de gros et second œuvre), fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite l'ensemble du secteur résidentiel (résidences principales) et une partie du secteur tertiaire, à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050.
	Champs et paramètres	L'unité fonctionnelle du modèle est le bâtiment type, ses résultats s'expriment en tonnage de matériaux.
	Chaînages et bouclages	Le modèle CONSOMAT a été intégré dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050. Il utilise en données d'entrées des volumes de construction et de rénovation issus d'ANTONIO et VIVALDI. Dans la mesure où il projette une demande en matériaux, il pourrait à l'avenir être utilisé dans des bouclages sur la disponibilité des ressources matérielles, si des modèles d'offre étaient disponibles.
	Questions et enjeux	Le modèle pourrait participer à une réflexion sur les enjeux de disponibilité des ressources matérielles et conflits d'usage, et sur des tensions/ruptures d'approvisionnement.

A3. MICO (ADEME)

Outil		
Modèle / outil	MICO	<i>Ce modèle porte sur la projection des consommations d'énergie liées aux besoins en climatisation pour l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires et sur l'ensemble du territoire, en fonction des évolutions climatiques.</i>
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	CODA Stratégies	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Céline LARUELLE Ingénierie au service bâtiment - ADEME Jean-Claude MIGETTE Directeur d'études - CODA Stratégies	celine.laruelle@ademe.fr jc.migette@codastrategies.com
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 22/02/2023. Revue et complétée par les auteurs le 31/10/2023. Fiche validée le 09/08/2024.	
Ressources	https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5182-la-climatisation-dans-le-batiment.html https://politiquedulogement.com/2023/08/lentree-de-la-climatisation-dans-les-foyers-français-2-quelles-perspectives-a-2050/	
Modèle général		
Finalité	Le modèle MICO (Modélisation des Impacts de la Climatisation sur la consommation) vise à modéliser de manière fine l'évolution de la consommation d'énergie dans les bâtiments liée à la climatisation.	
Type d'outil	C'est un modèle physique de simulation qui projette par agrégation la consommation d'énergie pour la climatisation des bâtiments résidentiels et non résidentiels.	
Champ de modélisation	Il s'inscrit dans le champ de la modélisation de la consommation d'énergie, dans lequel il est spécifiquement dédié à la projection de la consommation d'énergie pour les besoins de climatisation.	
Usage type / périodicité	Cet outil a été développé pour renforcer la modélisation spécifique de l'usage climatisation pour l'exercice Transition(s) 2050. Il a été développé et est opéré par CODA Stratégies	
Architecture	L'outil est développé sous Excel. Chacune des phases de la démarche se traduit dans un onglet dédié du classeur utilisé. Ainsi, le modèle décrit successivement l'ensemble du parc de bâtiments à considérer, puis la part équipée de solutions de climatisation, avant d'évaluer l'évolution des besoins en froid en fonction des caractéristiques des bâtiments et des conditions climatiques, et pour finir les consommations d'énergie associées en fonction du taux d'équipement, de l'évolution des équipements et de leur performance.	
Rythme d'actualisation	—	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre l'ensemble du secteur résidentiel (y compris les résidences secondaires) et du secteur tertiaire.
	Usages	MICO est dédié à la climatisation de confort thermique (il ne traite pas la climatisation de process).
	Population	La population n'est envisagée dans le modèle que dans un rôle d'occupation des bâtiments générant des besoins de confort thermique par climatisation. Elle n'est à ce titre décrite dans le modèle que sous l'angle de ses usages et comportements, et non en tant que telle.
Périmètre géograph.	Échelle	Le modèle travaille à l'échelle de l'ensemble du parc immobilier national, avec un niveau de désagrégation assujetti à ses données d'entrée. Il découpe à minima le parc de bâtiments en zones climatiques au sein de la France métropolitaine et pour chacun des territoires d'outre-mer.
	Territoire	Le modèle couvre la France entière, c'est-à-dire métropole et territoires d'outre-mer compris, en tenant compte de leur spécificité vis-à-vis des besoins en climatisation.
Périmètre temporel	Horizon	L'outil permet de projeter la consommation pour la climatisation à l'horizon 2050.
	Pas temporel	Il est calibré sur l'année 2020 et fonctionne avec un pas de temps de 10 ans
Principes de calcul	<p>Pour évaluer la consommation actuelle et son évolution sur la période 2020-2050, le modèle s'appuie en premier lieu sur des bases de données décrivant le parc de bâtiment tertiaires et de logements en surface et en nombre. Une évaluation des taux actuels de climatisation dans le secteur résidentiel et tertiaire, ainsi que la diffusion des différentes technologies permet d'évaluer ensuite les surfaces climatisées par type de technologie sur la période considérée.</p> <p>Parallèlement les besoins en froid par type de bâtiment sont évalués en considérant les échanges entre l'enveloppe du bâtiment et le milieu extérieur, les apports solaires liés aux vitrages et les apports internes (occupation, éclairage, bureautique...).</p> <p>Les conditions climatiques sont considérées par zone climatique en France (le territoire métropolitain est découpé en huit régions climatiques) et pour chacun des territoires d'outre-mer considérés. À partir de relevé sur un échantillon de stations météo, elles permettent d'évaluer un nombre d'heures annuelle dépassant les différents seuils de température générant le recours à la climatisation.</p> <p>L'évaluation des consommations est réalisée en considérant les besoins en froid aux différents seuils de température qui sont transformées en consommations énergétique via les coefficients de performance frigorifique (energy efficiency ratio, ou EER) des équipements de climatisation. Des hypothèses d'EER pour chacune des technologies sont établies à partir des données disponibles et des entretiens réalisés.</p> <p>L'EER évolue au cours du temps en fonction d'une hypothèse de progrès technologique, mais aussi sur chacun des pas de 10 ans par modification du mix au sein du parc d'équipement des différentes générations de matériels (substitution progressive des équipements de classe A, B et inférieures par des équipements de classe A++/A+++ par exemple pour la climatisation résidentielle).</p>	
Entrées	<p>Les principales entrées nécessaires au modèle sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • les conditions climatiques, qui sont modulées par zone géographique et peuvent intégrer différents scénarios d'évolution du climat ; 	

	<ul style="list-style-type: none"> le parc de bâtiments, avec une caractérisation en nombre, en surface de plancher, en caractéristique d'enveloppe et en taux d'équipement en climatisation, et des hypothèses sur l'évolution de ces différents paramètres; les usages et les comportements (température de consigne, durée d'utilisation...), avec les hypothèses sur leur évolution; la performance des équipements de climatisation et son évolution dans le temps.
--	---

Sorties	Sur cette base, le modèle fournit une description de l'évolution des besoins de rafraîchissement et de froid et des équipements mobilisés pour y répondre, avec comme résultat final une évolution de la consommation d'énergie finale pour la climatisation, dans chacune des zones climatiques considérées et pour chacun des secteurs, et pour finir agrégée.
---------	--

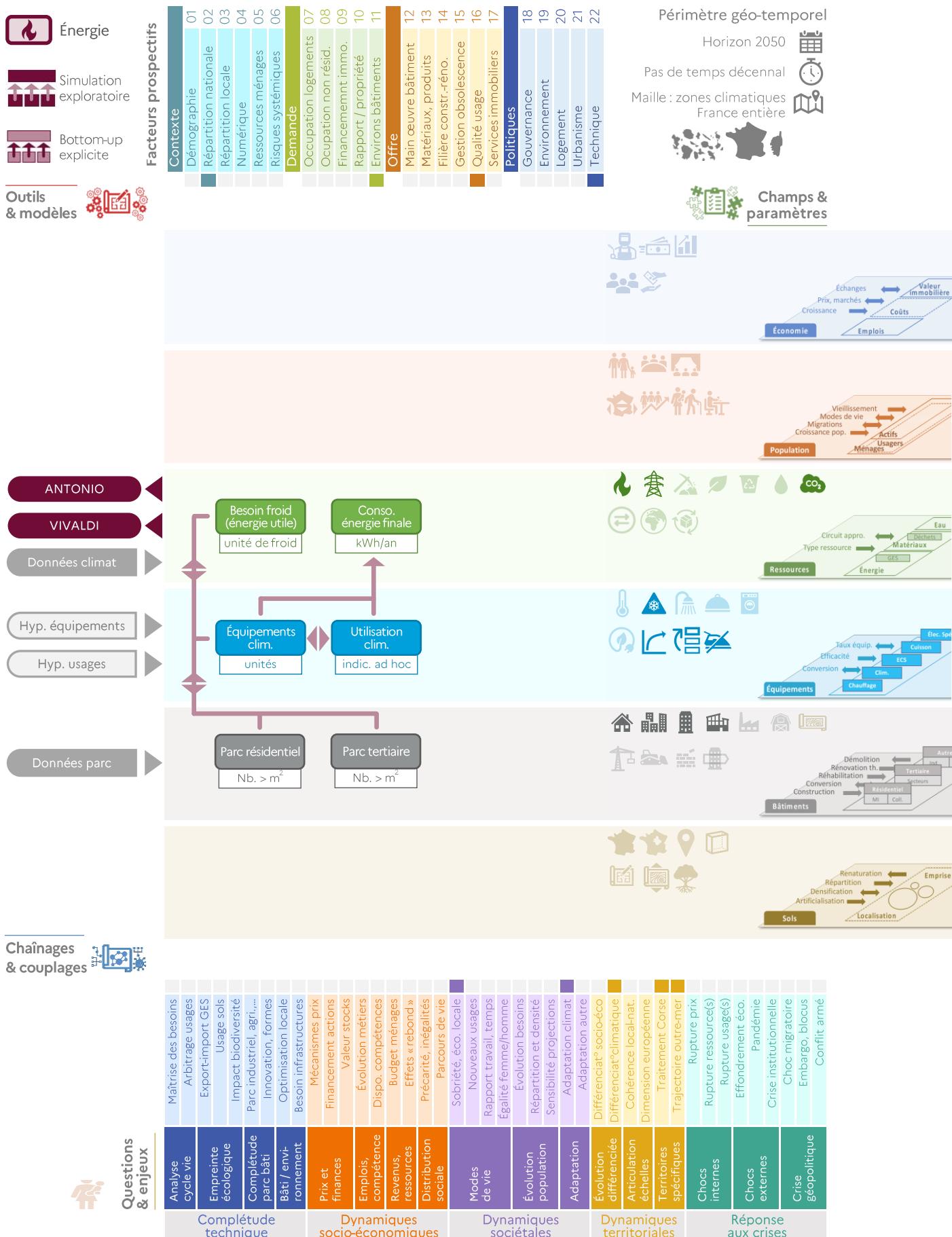
Éléments de discussion

Points forts	<p>Il s'agit a priori du premier modèle dans sa catégorie.</p> <p>Son calage est relativement fin, dans la mesure où son point de départ à 2020 s'est appuyé sur les données d'une enquête spécifique menée par l'ADEME pour documenter en détail les consommations d'énergie et les taux d'équipement existants pour la climatisation.</p> <p>L'outil présente aussi l'intérêt d'intégrer l'ensemble du parc résidentiel et tertiaire français et l'ensemble du territoire, y compris les territoires d'outre-mer.</p>
Questionnements et développements	<p>Ce modèle est une première étape dans la modélisation spécifique de la climatisation en France. Il présente donc naturellement de nombreux axes d'amélioration, parmi lesquels on peut citer :</p> <ul style="list-style-type: none"> l'enjeu d'une meilleure prise en compte des évolutions du climat, dans la mesure où ce paramètre clé peut faire l'objet d'incertitudes importantes. Ce point a fait l'objet de travaux complémentaires pour le secteur résidentiel en 2024. la possibilité de mieux prendre en compte le comportement thermique des bâtiments pour le confort d'été. <p>Des développements sont notamment prévus pour améliorer le lien entre l'état du bâti et le besoin de rafraîchissement.</p> <p>Une thèse en cours au CIRED porte par ailleurs sur l'introduction de la climatisation dans le modèle Res-IRF, ce qui permettra d'intégrer dans MICO des évolutions relatives aux dynamiques d'action sur les bâtiments et les équipements.</p>
Besoins identifiés	Données —
	Méthode —

Positionnement dans la cartographie

	<i>Outils et modèles</i>	MICO est un outil énergie de simulation exploratoire à visée prospective, fondé sur une description physique bottom-up explicite. Il traite l'usage spécifique de la climatisation sur l'ensemble du parc résidentiel et tertiaire et du territoire, avec une différenciation par zone climatique, à l'horizon 2050 et au pas de 10 ans à partir d'un calage en 2020.
	<i>Champs et paramètres</i>	L'outil travaille essentiellement dans trois dimensions : les bâtiments , qu'il représente par unités et surfaces de plancher pour estimer les besoins de froid en fonction de leurs caractéristiques, les équipements de climatisation, dont il représente les caractéristiques techniques, le taux de déploiement et les conditions d'usage, et les ressources au sens du besoin de froid en énergie utile et de sa traduction, en lien avec les deux dimensions précédentes, en consommation d'énergie finale.
	<i>Chaînages et bouclages</i>	Le module MICO a été développé pour alimenter directement avec des résultats spécifiques et détaillés sur la demande d'énergie finale liée à la climatisation les modèles d'agrégation de la consommation d'énergie pour tous les usages dans le résidentiel (ANTONIO , qui toutefois ne traite pas les résidences secondaires) et dans le tertiaire (VIVALDI). Il n'est en l'état pas relié à d'autres modèles et aucune évolution en matière de chaînage ou de bouclage n'est envisagée à ce stade.
	<i>Questions et enjeux</i>	De par son champ très spécifique, cet outil est assez peu relié aux différents questionnements prospectifs identifiés dans cette étude. Il peut toutefois être directement rapproché de l'enjeu que représente l'adaptation du parc de bâtiments à l'évolution climatique, de même que celui des dynamiques de différenciation qui peuvent intervenir entre territoires sous l'angle climatique. Il permet aussi d'interroger, sur l'usage spécifique qu'il traite, la question du niveau de sobriété. Il est également intéressant, dans la mesure où il couvre la Corse et l'ensemble de l'outre-mer et traite avec un niveau de détail important d'un usage particulièrement sensible dans certains des territoires concernés, pour informer plus largement la vision prospective spécifique à ces zones.

MICO (ADEME)



A4. MODEIRE (ADEME / Association négaWatt)

Outil		
Modèle / outil	MODEIRE	<i>Cet outil propose une modélisation détaillée de la consommation intérieure de matière de l'économie française, inclus le secteur de la construction, et de son évolution possible dans des scénarios de transition énergétique.</i>
Porteur(s)	ADEME / Association négaWatt	
Développeur(s)	Institut négaWatt, EnerTech et Solagro	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Sylvain SOURISSEAU Service Industrie - ADEME	sylvain.sourisseau@ademe.fr
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 07/03/2023 – relue le 10/03/2023. Revue et complétée par les auteurs le 20/10/2023. Fiche validée le 17/10/2024.	
Ressources	https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/340-transition-industrielle-prospective-energie-matiere-vers-un-outil-de-modelisation-des-niveaux-de-production.html	
Modèle général		
Finalité	Le modèle permet de projeter à 2050, en France métropolitaine, les consommations de matériaux nécessaires aux différents secteurs d'activité, afin de modéliser la production Industrielle, sa consommation énergétique et ses émissions GES, et évaluer la consommation intérieure de matière du territoire (et les enjeux de criticité associés).	
Type d'outil	Il s'agit d'un modèle de simulation exploratoire, techno-explicite et désagrégé de l'évolution de la consommation et de la production du point de vue des matériaux.	
Champ de modélisation	Il permet d'articuler les évolutions des biens de consommation et les besoins en matériaux énergivores et critiques, sur l'ensemble de l'économie, au périmètre du territoire métropolitain et en consommation intérieure de matière, tenant compte des importations et des exportations à plusieurs niveaux de chaînes de valeurs. Sa décomposition sectorielle couvre notamment le secteur de la construction.	
Usage type / périodicité	Ce modèle a été développé pour les besoins de construction de scénarios de prospective pour la décarbonation de l'industrie (Plans de Transitions Sectoriels) et pour l'exercice Transition(s) 2050. L'outil Pépit0, première version basée sur une adaptation pour l'ADEME de l'outil négaMat développé par l'Association et l'Institut négaWatt, est en accès libre sur demande auprès de l'ADEME. Les versions ultérieures sont co-propriété de l'ADEME et de négaWatt et ne sont pas disponibles publiquement.	
Architecture	<p>L'outil MODEIRE (MOdélisation de la DEcarbonation de l'Industrie Ressources-Energie) est un modèle bottom-up de quantification des besoins en matériaux de tous les secteurs, basé sur un découpage en 9 principaux secteurs et une subdivision plus fine pour les secteurs concernés par la transition énergétique, pour quantifier les besoins de production industriels, imports-exports, et l'impact en consommation intérieure de matière.</p> <p>MODEIRE est ainsi structuré en 3 parties :</p> <ul style="list-style-type: none"> la partie matériaux, qui calcule des flux en matériaux de base et matériaux transformés associés à la consommation finale de biens, tient compte des importations et exportations à différentes étapes des chaînes de valeur pour <i>in fine</i> estimer des trajectoires de production domestique ; la partie énergétique, qui à partir des niveaux de production et des intensités énergétiques calcule les consommations prospectives sur la base d'hypothèses de gains d'efficacité énergétique lié au déploiement technologique dans l'industrie ; la partie émissions de gaz à effet de serre (GES), qui calcule les émissions sur la base des combustions d'énergies impliquées et des émissions de process dont les quantités peuvent évoluer selon des hypothèses sur le déploiement de certaines technologies <p>L'outil sépare par ailleurs un bloc de caractérisation des flux pour l'année de référence, un bloc de construction des hypothèses applicables, telles qu'elles peuvent être tirées d'un scénario de transition énergétique considéré, et un bloc de calcul fournissant les résultats, en termes de chroniques annuelles et, pour certains indicateurs, de cumul sur la période modélisée.</p>	
Rythme d'actualisation	La première version de l'outil a été développée pour une étude en 2019, aboutissant à la conception du modèle Pépit0, issu de négaMat et développé par Institut négaWatt, EnerTech et Solagro. Il a été enrichi par la même équipe en 2020, et renommé MODEIRE, qui fait depuis l'objet de travaux d'approfondissement.	
Périmètre technique	Bâtiments	Voir module spécifique.
	Usages	Voir module spécifique.
	Population	Voir module spécifique.
Périmètre géograph.	Échelle	Le modèle opère à l'échelle du territoire national, tout en prenant en compte les flux associés aux importations et aux exportations.
	Territoire	Le modèle est calé sur une caractérisation et une projection au périmètre de la France métropolitaine.
Périmètre temporel	Horizon	L'horizon de temps n'est pas figé par le modèle, dans la mesure où il projette de façon exploratoire une trajectoire construite de façon incrémentale, mais il est calibré pour fournir des résultats aux horizons 2050 et 2070.
	Pas temporel	Le calcul des flux et des impacts est réalisé au pas de temps annuel.
Principes de calcul	<p>Les principes de calcul sont globalement issus de la structuration en matrices d'échanges entre étapes de transformation, entre secteurs et aux frontières du territoire, élaborée pour l'outil négaMat.</p> <p>A l'image de celui-ci, l'outil était initialement centré sur les 9 matériaux des industries grandes consommatrices d'énergie, ou IGCE (la production d'acier, d'aluminium, de clinker, de verre, les papiers cartons, l'éthylène, l'ammoniac, le dichlore et le sucre). Il a ensuite été élargi à de nombreux autres (notamment plâtre, chaux, céramiques, métaux non ferreux, batteries et électronique), jusqu'à couvrir une centaine de matériaux. Le modèle inclut un module de calcul de la consommation intérieure de matière ainsi qu'un calcul des quantités de matière brute extraite cumulée pour voir la criticité des ressources. Au-delà de cette modélisation sur le périmètre des matières premières, l'outil</p>	

		permet le calcul, sur la base de la même structure, de la consommation d'énergie associée aux procédés de transformation puis, en intégrant des hypothèses sur les sources d'énergie correspondantes et sur les évolutions de procédés, aux émissions de gaz à effet de serre que cette activité génère.	
Entrées	Les entrées du modèle concernent essentiellement les données, disponibles ou reconstituées, de caractérisation des flux pour l'année de référence, et les hypothèses permettant de projeter une évolution de la demande et des modalités de réponse à cette demande dans le cadre des scénarios étudiés.		
Sorties	Sur cette base, le modèle fournit une projection détaillée des flux de matériaux entrant et sortant du territoire et entrant et sortant de chaque étape de transformation dans chaque branche, permettant de projeter une évolution de la consommation intérieure de matières de l'économie, et des consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre associées.		
Détail			
Module spécifique	MODEIRE - volet BTP		
Périmètre technique	Bâtiments	Comme dans négaMat , le module BTP comprend le parc résidentiel complet, y compris les résidences secondaires et les logements vacants, et le parc tertiaire complet, inclus l'ensemble des commerces de grande distribution, hôtels, enseignement, bureaux(CHEB) et des autres – petits commerces, artisanat, services publics de santé, culture et loisir(CASCL), ainsi que les routes, réseaux ferrés, ouvrages d'art et énergie, voirie et réseaux divers(VRD) et divers travaux publics.	
Usages	Le modèle se concentre sur l'ensemble des besoins en matériaux associés au cycle de vie des bâtiments et ouvrages de travaux publics(construction, entretien et rénovation, réhabilitation ou démolition), hors usage par leurs occupants (celui-ci est pris en compte, à travers la demande finale en biens et en équipements, dans d'autres parties du modèle). Les matériaux modélisés incluent le béton, l'acier, l'aluminium, le verre, le PVC, les autres plastiques, les granulats hors béton, les céramiques, les isolants biosourcés, le bois sciage et le bois panneaux, le plâtre, le caoutchouc butyle EPDM, le bitume, l'inox, le cuivre(en distinguant usage pour électricité et autres usages), le zinc. La valorisation des déchets du BTP est également modélisée.		
Population	La population n'est pas décrite dans le modèle, qui ne modélise que les flux physiques de matières. Elle est cependant implicitement prise en compte puisque le modèle repose sur une caractérisation de la demande finale en biens et en équipements, et sur une projection de l'évolution de cette demande qui sont nécessairement associées à la population et son évolution.		
Périmètre géograph.	Échelle	Voir modèle général .	
	Territoire	Voir modèle général .	
Périmètre temporel	Horizon	Voir modèle général .	
	Pas temporel	Voir modèle général .	
Principes de calcul	Le volet BTP de MODEIRE s'intéresse au secteur du bâtiment et des travaux publics, incluant la construction, la rénovation, les infrastructures de transport et le VRD. Il distingue pour le secteur du bâtiment quatre segments: les maisons individuelles(MI), les logements collectifs(LC), le tertiaire et les bâtiments industriels, agricoles et artisanaux. Il leur applique des actions de construction neuve, et pour les bâtiments de rénovation au niveau BBC ou non BBC, établis en fixant des mètres et des quantitatifs. Ceux-ci sont ajustés pour recoller avec les flux totaux du secteur BTP à l'année de référence. Un taux annuel de destruction de bâtiments et d'ouvrages est également pris en compte. Le modèle reconstruit en bottom-up les besoins de matériaux à partir des rythmes de construction et de rénovation. L'application des matrices et la remontée des chaines matériaux fournit, comme dans les autres volets du modèle, un chiffrage de la consommation intérieure de matière associée à la demande finale du BTP, calculant également en fonction des procédés mobilités aux différentes étapes une consommation d'énergie associée, et en fonction des choix de vecteurs énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre correspondantes.		
Entrées	Le modèle requiert d'abord des hypothèses de caractérisation de l'état des flux pour l'année de référence, qui sont issues de données statistiques disponibles et en partie reconstituées par recollement avec les flux à l'échelle des secteurs. Il nécessite ensuite des hypothèses sur les évolutions au pas annuel des différents facteurs entrant en jeu: ceci inclut les hypothèses de construction neuve et de rénovation, d'évolution des modes constructifs, de niveaux d'isolation et de substitution entre matériaux. Ces hypothèses sont formulées pour les différents segments du parc de bâtiments considérés; des hypothèses similaires sont posées pour les travaux publics, notamment les rythmes de construction d'infrastructures de transport. Enfin, des hypothèses sont formulées sur le taux de collecte et de réutilisation par ressource.		
Sorties	Le modèle fournit une projection de l'évolution des besoins en matériaux, détaillés par catégorie comme indiqué plus haut, pour l'ensemble des opérations couvertes par le volet BTP, incluant les besoins de construction et de rénovation dans le bâtiment, les ouvrages d'art, les voiries (et VRD) et le ferroviaire. Il projette les besoins en matériaux, extraits sur le territoire ou résultant du solde des importations et des exportations. Il projette également la valorisation des déchets, avec les flux de matières valorisées et le détail disponible du devenir des déchets entre réemploi sur site, valorisation en remblai, recyclage, décharges de divers types (ISDI, ISDD, ISDND) et incinération.		
Éléments de discussion			
Points forts	À l'image de négaMat , ce modèle apporte une représentation de l'ensemble des flux matières associés à l'activité économique(production, consommation et échanges), avec une approche désagrégee et intégrée qui permet une description systémique et une analyse globale des transformations possibles. Celle-ci n'est pas seulement appliquée au bâtiment mais positionnée dans un périmètre plus complet d'empreinte de la construction, sur tout le secteur du BTP. Il présente également l'avantage de proposer une quantification directe en volumes de matières, indépendamment de leur valeur monétaire. Enfin, il repose sur un calibrage détaillé, « bottom-up » recalé pour la caractérisation des flux initiaux à l'année de référence sur les statistiques « top down ».		
Questionnements et développements	Dans le rebouclage de l'année de référence, il reste une part importante d'usages non identifiés pour certains matériaux. La caractérisation de l'état de référence, qui repose sur un croisement entre les données détaillées disponibles et les données agrégées par secteur, reste ainsi soumise à un certain degré d'incertitude.		

Une seule géométrie de bâtiment a été prise en compte par catégorie, avec une incertitude sur sa représentativité, notamment dans le secteur tertiaire. Le rebouclage avec **CONSOMAT**, **RENOMAT** ou encore **BTPFlux** permettrait de fiabiliser cette approche.

Par ailleurs, des difficultés sont apparues pendant la réalisation des scénarios *Transition(s) 2050* pour chaîner le modèle avec d'autres modèles utilisés par ailleurs dans le projet :

- sur la rénovation des logements, la difficulté porte sur la formulation des données d'entrée pour la version précédente de **MODEIRE** (Pepit0) avec des données issues du modèle **ANTONIO** et exprimées en nombre de logements rénovés – et non en nombre et types de gestes ;
- l'articulation est peu aisée avec d'autres modèles (**RENOMAT**, **CONSOMAT**) produisant des données similaires mais sur des périmètres légèrement différents (ex : **RENOMAT** ne prend en compte que la rénovation BBC des logements) ou avec des données de calcul différentes (par exemple, dans **CONSOMAT**, le calcul de la consommation de matières pour le tertiaire neuf repose sur quelques types de bâtiments neufs, avec les quantités de macrocomposants associés, qui ne sont pas celles utilisées dans **MODEIRE**).

Sur la partie relative aux travaux publics, il y a une difficulté liée à la modélisation de la rénovation des infrastructures routières et/ou de l'élargissement de l'existant pour intégrer des pistes cyclables. Elle se nourrit de doutes sur la disponibilité des données sur les travaux publics nécessaires à un approfondissement sur ce sujet.

Dans la version 2 de **MODEIRE** (en cours), l'année de référence sera actualisée à 2019. Un travail de coordination avec les données des plans sectoriels et les scénarios *Transition(s) 2050* de l'ADEME est prévu.

Besoins identifiés	Données	Comme pour son prédecesseur négamat , cet outil requiert des données sectorielles détaillées, qui ne sont pas suffisamment développées aujourd'hui pour réduire la part d'usages non identifiés dans la caractérisation de l'état initial. De même, des études sectorielles sont nécessaires pour mieux informer les hypothèses prospectives, afin d'étayer les choix retenus dans les scénarios que ce modèle permet de chiffrer.
Méthode	—	

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil de simulation exploratoire, technico-explicite et désagrégé de l'évolution de la consommation intérieure de matière de l'ensemble de l'économie française, avec la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre associées, fournissant des résultats au pas annuel jusqu'à un horizon 2050 ou 2070.
	Champs et paramètres	Du point de vue du champ, ce modèle se concentre naturellement sur les deux dimensions se rapportant physiquement le plus directement aux matières, dans lesquelles il ne traite le bâtiment que comme un secteur parmi d'autres : la dimension des ressources , essentielle dans son principe de modélisation centré sur une unité fonctionnelle liée aux tonnages de matériaux, où il couvre également l'énergie et les émissions de gaz à effet de serre, et celle des équipements à travers l'ensemble de la production et des échanges. Il intègre aussi pleinement la dimension bâtiments , via des unités de construction nouvelle et de gestes de rénovation appliqués à des surfaces de bâtiments pour différents segments du parc.
	Chaînages et bouclages	Le modèle MODEIRE participe de la suite d'outils mobilisés par l'ADEME pour l'élaboration de ses scénarios, mais fait l'objet de difficultés de chaînage avec d'autres modèles touchant au bilan matériaux du bâtiment comme CONSOMAT ou RENOMAT , du fait de différences de segmentation ou de calcul qui font l'objet d'un traitement. Il pourrait aussi être relié à BTPFlux .
	Questions et enjeux	Cet outil s'inscrit, avec quelques autres, dans un développement relativement récent visant à compléter les efforts de modélisation de trajectoires de transition en énergie au périmètre domestique national par une caractérisation des matériaux intégrés dans l'économie française, répondant ainsi à un questionnement qu'on pouvait considérer comme nouveau il y a une dizaine d'années. Même s'il ne se prête dès lors pas très directement à traiter d'autres nouvelles questions, des passerelles peuvent toutefois être identifiées vers certains enjeux. Tout d'abord, dans le même registre de la complétude technique , il présente l'intérêt de traiter au sein du même module les besoins associés au bâtiment et ceux associés aux infrastructures. Ensuite, dans le champ des dynamiques sociétales , sans entrer dans cette question par les modes de vie, il intègre directement des leviers liés à la sobriété, à l'économie circulaire et à l'évolution des usages. Enfin, même s'il est fondé sur un mode de simulation continuiste, qui ne vise pas à représenter une situation de réponse aux crises , il fournit à minima une approche pour s'interroger sur la robustesse vis-à-vis du risque de tension ou de rupture d'approvisionnement sur des ressources.

A5. Modèle biomasse (ADEME)

Outil		
Modèle / outil	Modèle biomasse	
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	FCBA, Inria et Arvalis	<i>Modélisation de l'adéquation (ou non) entre ressource et usages énergétiques et matériaux (donc hors alimentaire) de la biomasse sous ses différentes formes (agricole, sylvicole, biodéchets). Les usages portent donc en partie sur le bâtiment, mais pas seulement.</i>
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Nicolas TONNET Chef de service adjoint, Service Chaleur renouvelable - ADEME Florian ROLLIN Ingénieur thématique - Cellule Bois Biosourcés Biocarburants - ADEME	nicolas.tonnet@ademe.fr florian.rollin@ademe.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 23/03/2023. Fiche validée le 24/07/2024.	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	Modélisation de l'adéquation (ou non) entre ressource et usages énergétiques et matériaux (donc hors alimentaire) de la biomasse sous ses différentes formes (agricole, sylvicole, biodéchets). Les usages portent donc en partie sur le bâtiment, mais pas seulement.	
Type d'outil	—	
Champ de modélisation	—	
Usage type / périodicité	Outil interne, pas en accès public mais pas de confidentialité (l'outil a été mis à disposition).	
Architecture	Il s'agit d'un modèle sous Excel avec interfaces de saisie, réalisé sur financement Ademe par FCBA, Inria et Arvalis.	
Rythme d'actualisation	Pas de mise à jour de l'outil envisagée (d'un point de vue développement), mais utilisation en 2025/2026 pour nouvelle scénarisation (en actualisant certaines données, notamment de disponibilité de ressources)	
Périmètre technique	Bâtiments Usages Population	— Tous usages matière et énergie des biomasses —
Périmètre géograph.	Échelle Territoire	— France métropolitaine
Périmètre temporel	Horizon Pas temporel	À fixer par l'utilisateur de l'outil (selon les données mentionnées) Année de référence (2017/2018); les points de passage sont décidés par l'utilisateur de l'outil selon les hypothèses sur les données prospectives
Principes de calcul	L'outil confronte des ressources aux usages, avec un objectif d'équilibre entre les deux, et la possibilité d'agir aussi bien côté production que côté demande (tableaux emplois/ressources interactifs - TERI). Part de la ressource (bois, ressources agricoles, déchets, coproduits/sous-produits...) et des usages, puis itérations pour adéquation offre/demande (arbitrage usage matière/énergie, et filières de valorisation) en tenant aussi compte de l'enjeu séquestration carbone (traité dans un outil externe à partir des modifications de surfaces). Le gisement « durablement » utilisable est déduit du gisement total après application de plusieurs ratios reflétant différentes contraintes (techniques, environnementales, économiques...). Modélisation des usages matière et énergie (en arbitrant pour chaque biomasse les usages envisagés), et des process de transformation des différents types de biomasse (en précisant les rendements matière et énergie). Prise en compte des coproduits/sous-produits issus des procédés de transformation pour des usages matière ou énergie. Les usages énergie couvrent 4 grandes familles (combustion, biocarburant, pyrogazéification et biométhane), mais pas de distinction bâtiment au sein de ces usages. De même les usages matière pour le bâtiment ne sont pas distingués des autres secteurs : uniquement sciage, panneaux, papier/carton.	
Entrées	Les données d'entrée des besoins en matériaux pour le bâtiment sont issues de RENOMAT et CONSOMAT. MOSUT (outil de modélisation développé par Solagro) est utilisé pour les hypothèses surfaces agricoles et forestières/cheptels selon les évolutions des régimes alimentaires, des pratiques agricoles (agroécologie, CIVE et nouvelles cultures...), et du changement climatique.	
Sorties	Possibilités de visualisation Sankey des flux matière : ont accompagné le développement du site flux-biomasse.fr et de la société Terriflux (https://terriflux.com/)	
Éléments de discussion		
Points forts	Effort d'uniformisation des unités couramment rencontrées (tep, m3, Nm3...) en TWh & Tonnes matière sèche uniquement. Niveau de désagrégation des filières variable	
Questionnements et développements	Manque d'une instance de discussion/coordination nationale (ONF, INRAE, France AgriMer) sur la question de la biomasse. Méconnaissance globale de la communauté de ce qui existe comme données / modèles. Chiffrage imprécis des besoins bois du TP (en carto & prospective), qui recouvre notamment les bois d'utilisation temporaire (banche) Beaucoup de R&D en cours sur la mobilisation d'agro-ressources pour bâtiment, mais pour l'instant la biomasse prise en compte dans le modèle pour le bâtiment est surtout le bois.	

Besoins identifiés	Données	Besoin de préciser la disponibilité de la biomasse vs. changement climatique (mortalité en forêt) à des horizons court et moyen terme.
	Méthode	Gros chantier sur la réconciliation de données. Outil CARTOFOB de l'IGN ne satisfait pas tout le monde. -
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil de projection et d'allocation d'une ressource matérielle (la biomasse) entre ses différents usages, fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite l'ensemble des usages de la biomasse, à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050.
	Champs et paramètres	L'unité fonctionnelle du modèle est le volume de matériau (tonnes)
	Chaînages et bouclages	Le modèle a été intégré dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050. Il permet de documenter la disponibilité en bois, et, à ce titre, a permis un des seuls bouclages matière dans le secteur bâtiment dans Transition(s) 2050.
	Questions et enjeux	Le modèle pourrait participer à une réflexion sur les enjeux de disponibilité des ressources matérielles et conflits d'usage, et sur des tensions/ruptures d'approvisionnement.

A6. Modèle déchets et modèle AFMD (ADEME)

a) Modèle déchets

Outil		
Modèle / outil	Tableur Déchets	<i>Tableur Excel permettant de projeter les flux de déchets – dont ceux du bâtiment – et leur valorisation, à 2050</i>
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	ADEME	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Anna PINEAU Coordinatrice prospective et référentiel économie circulaire - ADEME	anna.pineau@ademe.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 09/03/2023. Fiche validée le 12/07/2024.	
Ressources	-	
Modèle général		
Finalité	Modélisation prospective des flux de déchets et de leur valorisation	
Type d'outil	Tableur Excel	
Champ de modélisation	La production de déchets ménagers, de déchets de déchèteries, de déchets d'activité économie (industrie et commerce) et déchets du bâtiment ; leur traitement ; l'énergie produite par l'incinération des déchets, l'incinération des CSR et la valorisation des gaz de décharge. Une première estimation de déchets envoyés vers le recyclage.	
Usage type / périodicité	Utilisé pour les Transition(s) 2050 en 2021. Repris et adapté par la DGEC pour la SNBC en 2022.	
Architecture	Le tableau est structuré en plusieurs onglets : <ul style="list-style-type: none"> - Onglets de saisie de données (onglets blancs) pour l'année de référence - Onglet de scénarisation (onglets jaunes) avec des hypothèses renseignées par scénario. Les hypothèses sont principalement exprimées en % d'évolution du tonnage. - Onglets de calcul (onglets bleus) de tonnages par scénario. - Onglets de résolution de résultats (onglets saumon). 	
Rythme d'actualisation	Pas de développement spécifique prévus car un nouvel outil est en cours de construction, modèle Analyse Flux Matière Dynamique (AFMD). Néanmoins, le Tableur Déchets pourrait être utilisé dans la mise à jour des scénarios Transition(s) 2050 en 2025 en fonction du cadrage de l'exercice.	
Périmètre technique	Bâtiments	Pour le BTP : le périmètre est le bâtiment (démolition, rénovation, construction neuve); les travaux publics ne sont pas pris en compte.
	Usages	La définition du "déchet" pour l'outil est celle de l'objet collecté. Le réemploi ou la seconde vie sans passer par un organisme de collecte public est traité dans l'hypothèse de prévention de déchets. Le réemploi côté ménages sera traité de manière plus détaillée par Rafaelle DESPLATS dans l'Outil Conso ; le réemploi en entreprise est à affecter entre MODEIRE et le futur outil Déchets.
	Population	-
Périmètre géograph.	Échelle	-
	Territoire	France métropolitaine
Périmètre temporel	Horizon	2050
	Pas temporel	Point de départ est 2015, année 2030 en point de passage et 2050 en horizon de modélisation.
Principes de calcul	La modélisation Déchets est basée sur les statistiques des déchets remontant des territoires (bottom-up) avec un niveau de détail très fin. L'inconvénient est d'avoir des paramètres restreints dépendants des enquêtes « facilement » accessibles à l'ADEME. Les flux sont calculés par multiplication des données de l'année de référence par les hypothèses d'évolution exprimés en %. Les hypothèses prennent en compte des objectifs réglementaires existants, des politiques publiques en cours et leur évolution possible dans la logique de chacun des scénarios. Les valeurs chiffrées des hypothèses sont validées par les experts ADEME et argumentés autant que possible dans l'outil.	
Entrées	Enquêtes Collecte Enquête ITOM Enquête INSEE Chiffres clés déchets Des études ponctuelles sur déchets des différentes filières économiques. Les données du secteur Bâtiment proviennent des travaux du Service Bâtiment de l'ADEME.	
Sorties	Flux de déchets, produits de valorisation énergétique, flux de déchets orientés vers recyclage (sur un périmètre restreint).	
Éléments de discussion		
Points forts	Modèle léger et flexible maîtrisé par l'ADEME.	
Questionnements et développements	Le modèle est limité. Il couvre un périmètre restreint de déchets car le calendrier des travaux n'a pas permis d'effectuer un travail nécessaire de recueil de données. L'outil ne permet pas un contrôle de cohérence des hypothèses de l'évolution globale et des hypothèses par fraction de matière. Durant la modélisation pour Transition(s) 2050, les modéliste ont dû procéder à un rapprochement artificiel des volumes globaux et par fraction matière pour éviter des incohérences.	
Besoins identifiés	Données	Elargir le périmètre des flux de déchets décrits en point de référence (déchets dangereux, déchets couverts par les REP, etc.)
	Méthode	L'outil représente deux lacunes méthodologiques majeures :

- L'évolution des flux de déchets ne prend pas en compte l'évolution du système productif et de consommation puisque la modélisation démarre avec les déchets collectés.
- Par conséquent, la composition matière des déchets n'est pas projetée de manière cohérente pour évaluer le potentiel des produits de valorisation des déchets (recyclage et énergie).

Ses lacunes poussent la Direction Economie Circulaire développer un outil Analyse Flux Matière Dynamique afin d'avancer vers une modélisation plus cohérente et plus robuste.

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil de projection des déchets produits par l'économie française, fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite d'une partie des déchets français, à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050.
	Champs et paramètres	L'unité fonctionnelle du modèle est le volume de déchets (tonnes).
	Chaînages et bouclages	Le modèle a été intégré dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050. Il intègre les résultats sur les volumes de construction et de rénovation issus des modèles ANTONIO et VIVALDI.
	Questions et enjeux	Le modèle pourrait participer à une réflexion sur les enjeux de disponibilité des ressources matérielles.

b) Modèle AFMD

Outil		
Modèle / outil	Modèle AFMD (nom à venir)	<i>Modélisation prospective des flux de matières, de déchets et de leur valorisation (y compris pour le secteur du bâtiment) basé sur l'analyse de flux de matière dynamique (AFMD)</i>
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	ADEME	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Anna PINEAU Coordinatrice prospective et référentiel économie circulaire - ADEME	anna.pineau@ademe.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 09/03/2023. Compléments apportés par les auteurs le 12/07/2024. Fiche validée le 12/07/2024.	
Ressources	Le modèle AFMD de l'ADEME sera basé sur un modèle existant ODYM-RECC: https://www.industrialecology.uni-freiburg.de/odym-recc	
Modèle général		
Finalité	Modélisation prospective des flux de matières, des flux de déchets, de produits de leur valorisation et des pollutions générées. Le modèle a vocation à remplacer le modèle Déchets.	
Type d'outil	Algorithme Python	
Champ de modélisation	L'analyse de flux de matières dynamique (AFMD) vise à quantifier les stocks et flux de matières dans un périmètre géographique et temporel donné. Appliquée à l'échelle nationale, l'approche permet d'estimer les flux entrants de matériaux visés (imports, production locale) permettant de répondre à une demande en produits et services (par exemple, les automobiles, les bâtiments, etc.), ainsi que l'accumulation de matériaux dans l'économie au fil du temps, et la génération de déchets par typologie de produits et/ou de matériaux. L'outil AFMD de l'ADEME accordera une attention particulière à la gestion de fin de vie des produits pour décrire des différents modes de collecte et de traitement des déchets, ainsi que les produits de leur valorisation sous forme de matière et d'énergie.	
Usage type / périodicité	L'usage type de l'outil serait la projection des flux de matières basée sur l'évaluation de stocks d'équipements nécessaires pour assurer des niveaux de vie des Français dans le temps.	
Architecture	L'architecture du modèle comprend les éléments suivants : <ol style="list-style-type: none"> 1. Un fichier Excel de classification définissant l'ensemble des aspects pris en compte dans le modèle et leur attribuant un numéro d'item. Il contient toutes les aspects, dimensions et paramètres requis pour un modèle donné, tels que les années, régions, phases du cycle de vie (production, manufacture, recyclage, etc.), matériaux regroupés par éléments, matériaux, produits et secteurs, et leur attribue des numéros d'identification. 2. Un fichier Excel de configuration établissant la nomenclature des aspects pris en compte dans le modèle (les aspects définis dans le document de classification, énoncé ci-dessus), leur indexation, ainsi que la relation entre ces derniers (structure de l'index), tels qu'ils seront opérés dans le modèle. 3. Un fichier Excel de données d'entrée par aspect considéré dans le modèle (par exemple, la composition matière par produit, les coefficients de transfert des différents procédés de transformation, etc.). L'incertitude peut être renseignée pour chaque donnée. 4. Le cadre méthodologique d'ODYM nécessite l'installation d'un environnement Python. Un modèle basé sur ODYM fait appel à plusieurs fonctions, certaines requérant une installation préalable de paquets Python pour pouvoir faire tourner le modèle (par exemple, pandas et matplotlib). Il est spécifié que les paquets numpy et scipy doivent être de version supérieure ou égale à 1.0 et 0.14, respectivement. Le modèle d'AFMD dépendant de classes (voir : 	

		<p>https://docs.python.org/fr/3/tutorial/classes.html) permet de combiner les données d'entrées et différentes fonctions.</p> <p>Les modules du cadre ODYM, soient dynamic_stock_model, ODYM_Classes et ODYM_Functions, constituent le cœur de l'implémentation du cadre conceptuel d'ODYM en code Python et doivent être inclus dans le répertoire. Un module Python permettant de poursuivre les objectifs spécifiques d'une étude d'AFMD doit être développé, soit depuis zéro, ou alors en s'inspirant du code d'une étude existante fourni en libre accès.</p>
Rythme d'actualisation		En fonction des études prospectives cherchant à évaluer les flux matières dans l'économie.
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle AFMD de l'ADEME se basera sur les modèles du Service Bâtiment pour décrire le parc de bâtiments et leur évolution.
	Usages	L'outil AFMD couvrira différentes phases de cycle de vie de produit (production de matériaux, fabrication des biens, usage des biens, gestion de fin de vie). L'outil devra prendre en compte à la fois l'usage des consommateurs et des entreprises. Dans la phase gestion de fin de vie le producteur de déchets sera autant que possible identifié entre ménage, institution ou entreprise.
	Population	La population est une donnée d'entrée qui contribue à la calibration du modèle.
Périmètre géograph.	Échelle	Nationale
	Territoire	France métropolitaine et potentiellement Outre-Mer.
Périmètre temporel	Horizon	2050
	Pas temporel	Pas de temps annuel
Principes de calcul		<p>Modèle AFMD dit « stock-driven ». Les données d'entrée du modèle sont des stocks d'équipements, leur composition matière et leur durée de vie.</p> <p>Les institutions françaises et notamment l'ADEME disposent d'une statistique déchets qui est assez complète. Elle fait référence auprès des acteurs du secteur du déchets que l'on cible avec la prospective.</p> <p>Les flux de déchets sont calculés par le modèle à partir de ses données tout en intégrant les données de la statistique déchets.</p>
Entrées		On peut distinguer trois types de données qui seront requis pour une modélisation AFMD : des données techniques (efficacité des procédés, compositions matières, production de déchets, émissions de GES, etc.), des données socio-économiques (PIB, quantités de produits par habitants, imports/exports, etc.), et des données scénaristiques (variation de paramètres au fil du temps, alignement éventuel avec des objectifs réglementaires ou fixées arbitrairement pour illustrer les scénarios).
Sorties		<ul style="list-style-type: none"> La description des flux de matières visés dans l'étude à travers les étapes de cycle de vie et les secteurs étudiés, y compris les flux de matières qui retournent dans l'usage entre différentes phases du cycle de vie. Les produits de valorisation des déchets tels que matières premières de recyclage ou l'énergie sous forme de gaz, d'électricité ou de chaleur. Le stock de matières à travers le cycle de vie. Les pertes de matières à travers le cycle de vie et dans le temps.
Éléments de discussion		
Points forts		<p>Modélisation des flux de déchets est intégrée avec la modélisation des secteurs économiques et de la consommation.</p> <p>Meilleure représentation de l'évolution de la composition des déchets.</p> <p>Vision dynamique de la sortie des biens hors usage.</p> <p>Modélisation du stock de matières dans l'économie.</p> <p>Vision intersectorielle des flux de matières.</p>
Questionnements et développements		Le développement du modèle en 2025-2026
Besoins identifiés	Données	Mettre en place l'articulation des données entre les modèles sectoriels sur les bâtiments (résidentiels et tertiaires), sur le transport, sur l'énergie et sur l'industrie depuis les outils existants de l'ADEME.
	Méthode	Afin d'alimenter des réflexions sur l'impact économique des mesures de politiques publiques en matière de gestion de déchets, il est nécessaire de représenter les coûts des dispositifs associés.

A7. MatMat et ImpactsConso (ADEME)

a) MatMat

Outil		
Modèle / outil	MatMat (Matrices Matières)	Outil de projection de l'empreinte matière et carbone de l'économie française en 2050, fondé sur une approche top-down (matrices entrée-sortie de l'économie française), à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine.
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	ADEME, CIRED, SMASH	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Fanny VICARD Economiste, Service Economie Finance – ADEME Antoine TEXEIRA Economiste, Service Economie Finance – ADEME	fanny.vicard@ademe.fr antoine.texeira@ademe.fr
Prise d'information	Cette fiche reprend dans sa partie descriptive des éléments de texte publiés dans les ressources ci-dessous. Fiche validée le xx/xx/2024	
Ressources	https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/3880-construction-de-matrices-de-flux-de-matières-pour-une-prospective-intégrée-énergie-matières-economie.html https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-énergie/6466-matmat-extension-et-developpement-du-modèle-de-prospective-intégrée-énergie-matière-economie.html https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-énergie/6250-prospective-transitions-2050-feuilleton-empreintes.html	
Modèle général		
Finalité	MatMat est un modèle de comptabilité environnementale Entrée-Sortie qui permet une analyse prospective des pressions environnementales (émissions territoriales de gaz à effets de serre, empreinte carbone, besoins en matériaux transformés et empreinte matières) associée à l'activité de l'économie française	
Type d'outil	Top-down	
Champ de modélisation	Modèle Entrées-Sorties en unités mixtes (flux monétaires & unité physique), à 200 produits, s'appuyant sur la base de données Exiobase au format EEIO (formalisme entrée-sortie avec extensions environnementales) 33 secteurs extracteurs de matières premières	
Usage type / périodicité	Le modèle a été utilisé dans le cadre de l'exercice de prospective ADEME Transition(s) 2050. Il est également utilisé pour l'évaluation de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) 3. Une application à la SNBC-2 a également été faite dans le cadre d'une publication scientifique.	
Architecture	<ul style="list-style-type: none"> Module de calibration, qui permet de construire une base de données de calibration Module de traduction qui permet de traduire automatiquement des scénarios prospectifs au format EEIO à partir des sorties du modèle macro-économique ThreeME, et des expertises sectorielles Module de résolution, qui permet la construction, la manipulation et la résolution d'un système EEIO à l'échelle d'une région (comme la France) et d'un ensemble d'extensions environnementales et socioéconomiques. Ce module permet de produire une analyse des pressions environnementales pour une année de référence ou en prospective sur la base du système de paramétrisation définis dans le module précédent. 	
Rythme d'actualisation	Dans sa version initiale, le modèle permettait de mesurer l'empreinte matière de l'économie française par vecteur et produit de la demande finale pour une année de référence mais aussi en projection dans le cadre de l'évaluation de scénarios prospectifs. Des développements ont été menés pour améliorer la mesure de l'empreinte matières, mais aussi pour étendre son périmètre à l'évaluation des besoins en matériaux transformés (i.e. toute matière qui a subi une transformation pour pouvoir être utilisée dans la fabrication de produits finis, ex : acier, ciment...) et à l'empreinte carbone.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le secteur bâtiment est inclus dans le secteur Construction qui englobe les activités de construction des Bâtiments et le Génie Civil
	Usages	—
	Population	—
Périmètre géograph.	Échelle	-Nationale
	Territoire	France métropolitaine
Périmètre temporel	Horizon	2050
	Pas temporel	Annuel
Principes de calcul	La méthodologie de calcul des empreintes relève d'une approche top down similaire à celle du SDES. Elle permet de prendre en compte les spécificités de l'ensemble des chaînes d'approvisionnement en France et à l'étranger. Elle se distingue des approches bottom up qui proposent une représentation détaillée avec différentes technologies par produit, mais souvent mises au service d'analyses à micro (voir méso) échelle.	
Entrées	Principalement Exiobase	
Sorties	Les principales variables qui sont paramétrées dans le modèle sont : <ul style="list-style-type: none"> Ratio import / production intérieure Coefficients techniques Demande finale Le modèle produit des tables SRIO (Single Region Input-Output) et ses extensions (e.g. GES, matières), ainsi que des traitements statistiques complémentaires pour les analyses en empreintes	

Éléments de discussion		
Points forts	Le formalisme Entrée-Sortie de MatMat permet de décrire l'économie à un niveau de désagrégation intermédiaire entre les modèles macro-économiques et les analyses plus fines comme l'inventaire de cycle de vie. Il permet d'englober l'ensemble des chaînes de valeur et de transformation de la matière pour l'ensemble des biens et services de l'économie. Le niveau de désagrégation sectorielle des bases de données IO est généralement bien supérieur à celui des modèles macro-économiques utilisés pour simuler les scénarios bas carbone. Appliquée aux résultats de modèles macro-économiques comme ThreeME, l'analyse Entrée-Sortie étoffe considérablement le mesure de l'impact matière des changements économiques et technologiques considérés.	
Questionnements et développements	Sur le secteur bâtiment en particulier, des travaux ont notamment été engagés pour désagréger le secteur de la Construction, de manière à mieux représenter et isoler en prospective les investissements dans la construction de bâtiments, dans la rénovation et dans le génie civil. Ces travaux sont à poursuivre. Par ailleurs, l'approche Entrées-Sorties propose une représentation agrégée des biens et services, en leur associant une unique technologie de production moyenne. Par exemple, il n'est pas possible de suivre distinctement des modes constructifs différents des bâtiments. Dès lors, la structure de production et les chaînes d'approvisionnement sont le reflet de celles existantes à l'année de référence, qui ne seront pas nécessairement le reflet de la structure de production moyenne en 2050 si la part des différents modes constructifs évoluent.. Des réflexions sont en cours pour mieux intégrer à moyen terme dans le modèle MatMat ces changements technologiques et évolutions de la demande pour les secteurs clés de la transition.	
Besoins identifiés	Données	A terme, l'outil ImpactConso (en cours de développement) viendra informer MatMat Des données d'analyse/inventaire de cycle de vie pourraient venir compléter les données
	Méthode	Améliorer la désagrégation de la construction (cf ci-dessus)

Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil de projection de l'empreinte matière et carbone de l'économie française, fondé sur une approche top-down (matrices entrée-sortie de l'économie française), à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à horizon 2050.
	Champs et paramètres	L'unité fonctionnelle du modèle est le flux (monétaire ou physique) entrant et sortant de l'économie française.
	Chaînages et bouclages	Le modèle a été intégré dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050. Il intègre les résultats sur les volumes de construction et de rénovation issus des modèles ANTONIO et VIVALDI. Un bouclage avec le modèle ThreeME est opéré. ThreeME permet de considérer les effets de transferts d'activité et de consommation dans l'économie via une modélisation des comportements des agents économiques et des effets prix / compétitivité. Au-delà des enjeux macroéconomiques, le modèle ThreeME intègre également les transformations des systèmes énergétiques via des modules sectoriels dédiés. Le modèle MatMat concatène quant à lui les expertises sectorielles de l'ADEME sur la matière. Le bouclage entre les deux modèles permet ainsi de proposer une évaluation de scénarios intégrés énergie-matière-économie avec un réalisme technique et une cohérence macroéconomique.
	Questions et enjeux	Le modèle pourra participer à une réflexion sur les enjeux de disponibilité des ressources matérielles.

b) ImpactsConso

Outil		
Modèle / outil	ImpactsConso	
<i>Outil en cours de développement dédié à l'évaluation environnementale de la consommation en France. Il ne s'agit pas d'un outil de prospective, mais d'un module destiné à s'articuler avec les modèles prospectifs Matmat et ThreeMe.</i>		
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	2.0-LCA Consultants/Cired	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Rafaelle DESPLATS Prospective et évaluation environnementale de la consommation, Service consommation responsable - ADEME	rafaelle.desplats@ademe.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 06/04/2023. Fiche validée le 13/08/2023	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	L'outil ImpactsConso est dédié à l'évaluation environnementale de la consommation en France. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un modèle de prospective, mais d'une image à T0 qui permettra d'alimenter des outils de prospective de type MatMat et ThreeMe.	
Type d'outil	L'outil adopte une approche top-down, c'est à dire « entrée sortie » (au sens de la modélisation économique input-output, ou EEMRIO pour environmentally extended multi-regional input-output) et à (long) terme probablement hybride avec des données bottom-up (ACV).	
Champ de modélisation	France + reste du monde désagrégé	
Usage type / périodicité	L'outil est actuellement en cours de développement. Celui-ci aura plusieurs objectifs : <ul style="list-style-type: none"> Fournir un état des lieux des impacts environnementaux de la consommation française actuelle de biens et services (couverture complète de l'économie, construction et infrastructures comprises), avec une caractérisation des impacts; 	

		<ul style="list-style-type: none"> Faire un focus sur les impacts environnementaux de l'ensemble des biens et services hors alimentation, construction (la construction des bâtiments est exclue mais la fabrication de ce qui est dans le logement, ameublement, électroménager etc. est inclus) et mobilité. Identifier les déterminants des impacts de la consommation des ménages.
Architecture		Exiobase V4-HIO – Nomenclature COICOP - Couplage avec les variables de l'enquête Budget de Famille (INSEE, 2017) – Ecriture sous Python via l'outil Brighthway
Rythme d'actualisation		Pas encore défini
Périmètre technique	Bâtiments	—
	Usages	Modélisation des biens et services de la France entière.
	Population	—
Périmètre géograph.	Échelle	—
	Territoire	France entière a priori pour la modélisation économique. Les DROM ne sont pas différenciés.
Périmètre temporel	Horizon	Photographie sur une année de référence uniquement (pas de portée prospective → couplage avec MatMat) – 2016 aujourd'hui
	Pas temporel	—
Principes de calcul		<p>L'outil ImpactsConso s'appuie sur la version 4 hybride (HIO) de la base de données Exiobase (https://www.exiobase.eu/) qui est un outil entrée-sortie élargi à l'environnement et multi-régional (EE MRIO).</p> <p>Exiobase V4-HIO couvre l'économie à l'échelle nationale à travers 700 catégories de produits (biens et services). Les flux élémentaires issues des extensions environnementales sont ensuite traduites en impacts à travers les méthodes de caractérisation empruntes à l'ACV (ImpactWorld+, Recipe et à terme en suivant les recommandations du GLAM). Ce n'est cependant pas un modèle dynamique, au sens où il ne comporte pas de modèles de comportements d'agents (IAM).</p> <p>L'outil est destiné à servir les besoins d'évaluation environnementale macro de l'ADEME en caractérisant les impacts, en disposant d'un degré de finesse plus élevé sur les catégories de produits considérées ainsi que sur la modélisation déjà intégrée des différentes régions du reste du monde, en désagrégant les empreintes des ménages, etc. En revanche, il ne fonctionne pas en prospective. En ce sens, il aura justement vocation à s'articuler avec :</p> <p>i/ MatMat (qui est aussi un modèle entrée-sortie s'appuyant sur la version monétaire d'Exiobase, plus « frustre » mais disposant justement d'un module de prospective).</p> <p>ii/ indirectement avec ThreeME, modèle dynamique, dont le couplage avec MatMat est déjà opérant. ImpactsConso devrait s'articuler également à terme avec le modèle déchets (MFA - analyse en flux matière) dont la construction est envisagée en 2025.</p> <p>La modélisation entrée-sortie peut permettre d'intégrer la modélisation de leviers d'efficacité et de leviers de demande (voir ci-après).</p>
Entrées		<p>A terme, on peut imaginer que les éléments à fournir à l'outil soient les résultats des sorties de MatMat, elles-mêmes héritées des sorties du modèle économique ThreeME ; soit au final la quantité (demandes finales, exprimées en €) de chacun des 700 biens et services répertoriés par ImpactsConso.</p> <p>Les leviers d'efficacité sont notamment des leviers de type industriels (mix énergétique de la production, rendements des process). Ces hypothèses seront établies en lien avec le service Industrie. Les leviers de demande agissent plutôt sur la répartition de la demande finale.</p>
Sorties		<p>Evaluation environnementale de la consommation totale actuelle.</p> <p>Evaluation des impacts environnementaux de scénarios de prospective via son dialogue avec MatMat (et ThreeMe).</p>
Éléments de discussion		
Points forts		<p>Modèle entrée-sortie mondial et rebouclé.</p> <p>Modélisation fine des flux et zones mondiales impliquant une réconciliation déjà opérée des flux du commerce international dans le modèle MREEIO.</p> <p>Couplage avec les méthodes de caractérisation à travers l'interface Brighthway pour l'évaluation environnementale multi-critères.</p>
Questionnements et développements		<p>Degré de cohérence un peu moindre dans la représentation de l'économie française (modèle cohérent à l'échelle mondiale mais pas spécifiquement créé pour la France/légers écarts par rapport à la comptabilité nationale de l'INSEE et donc aux travaux du SDES et de MatMat)</p> <p>Pas de module de prospective.</p> <p>Certains leviers de la transition semblent plus difficiles à modéliser dans une approche MRIO, notamment les leviers de sobriété. Le couplage avec d'autres approches plutôt bottom-up devrait permettre de modéliser ces évolutions et de modifier les flux au niveau de MatMat et/ou de l'outil ImpactsConso.</p> <p>Les approches EEIO peuvent permettre d'évaluer les conséquences environnementale «macro» de politiques diverses (sobriété, efficacité, etc.) mais nécessitent qu'au préalable les travaux bottom-up aient été conduits (généralement ACV-c auquel les modèles EEMRIO peuvent être hybridés)</p>
Besoins identifiés	Données	Pas abordé
	Méthode	Pas abordé

A8. RENOMAT (ADEME)

Outil		
Modèle / outil	RENOMAT	<i>Le modèle projette les besoins en ressources matérielles (gros et second œuvre) liées à la rénovation BBC des logements à 2050</i>
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	TBC Innovations	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Philippe LÉONARDON Coordinateur thématique - ADEME	philippe.leonardon@ademe.fr
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 22/02/2023 Fiche validée le 09/08/2024.	
Ressources	https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/439-prospectives-2035-et-2050-de-consommation-de-materiaux-pour-la-construction-neuve-et-la-renovation-energetique-bbc.html	
Modèle général		
Finalité	Consommation de matériaux et production de déchets liée à la rénovation énergétique BBC des logements.	
Type d'outil	Bottom-up	
Champ de modélisation	Le modèle porte spécifiquement sur les consommations de ressources matérielles du secteur résidentiel	
Usage type / périodicité	Modèle développé en 2019 dans le cadre d'une étude ADEME par TBC Innovations. Ré-utilisé tel quel pour <i>Transition(s) 2050</i> .	
Architecture	Ensemble de feuilles Excel	
Rythme d'actualisation	-	
Périmètre technique	Bâtiments	Secteur résidentiel (résidences principales et résidences secondaires) La segmentation retenue est celle du rapport PACTE
	Usages	Matériaux de construction, mais ne prend pas en compte les équipements. Seuls les travaux à caractère énergétique sont concernés. Le niveau de performance visé par les travaux de rénovation est le niveau BBC.
	Population	-
Périmètre géograph.	Échelle	France métropolitaine
	Territoire	Il fonctionne à la maille nationale et ne comporte pas de désagrégation territoriale.
Périmètre temporel	Horizon	2050
	Pas temporel	Deux étapes, 2035 et 2050
Principes de calcul	Simulations énergétiques de bâtiments types, à la fois pour le parc de maisons individuelles et le parc de logements collectifs. Des typologies et des cas types de bâtiments ont été définis et les simulations ont permis de déterminer les bouquets de travaux et niveaux de performance nécessaires pour atteindre le niveau BBC. À partir de ces résultats et des mètrés de chaque bâtiment type, les quantitatifs de matériaux ont été établis en considérant différents scénarios de rénovation : à la fois quantitatif (pour chaque typologie de bâtiments, combien sont rénovés annuellement) et qualitatif (quelles solutions techniques, quels matériaux sont utilisés pour réaliser les travaux). Volume de rénovation (quantité, évolution des solutions techniques).	
Entrées	Volume de rénovation (m ²) Part des solutions constructives	
Sorties	Quantités de matériaux Quantités de déchets	
Éléments de discussion		
Points forts	Précision sur les ressources utilisées par les rénovations	
Questionnements et développements	Les modélisations thermiques n'ont été faites que sur une zone climatique (H2a). Pour mener à bien ce travail, un nombre important d'hypothèses ont dû être prises. Ainsi, certains points mériteraient des investigations plus poussées afin d'améliorer la fiabilité des résultats : <ul style="list-style-type: none">• L'évaluation du nombre de bâtiments de logements collectifs, les données statistiques existantes ne fournissant que des nombres de logements ;• La définition des parts de marché initiale des solutions de rénovation utilisées, les données utilisées présentant toutes des biais ne permettant pas de cibler précisément la rénovation au niveau BBC des maisons individuelles et des logements collectifs ;• Une évaluation de l'impact de la zone climatique sur les quantitatifs de matériaux ;• Une analyse approfondie sur les équipements de chauffage et ECS existant et sur les solutions envisagées pour les rénover. Une piste d'approfondissement est l'ouverture à des gestes isolés de rénovation et aux besoins en matériaux associés à la rénovation non thermique. Elle pourra être effectuée dans le cadre du modèle BTP Flux du CSTB.	
Besoins identifiés	Données	La décomposition des solutions de rénovation en matériaux, les données disponibles aujourd'hui étant incomplètes ou peu précises.
	Méthode	
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil de projection des besoins en ressources matérielles liées à la rénovation BBC de logements (matériaux de gros et second œuvre), fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite l'ensemble du secteur résidentiel (résidences principales), à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050.

	Champs et paramètres	L'unité fonctionnelle du modèle est le bâtiment type, ses résultats s'expriment en tonnage de matériaux.
	Chaînages et bouclages	Le modèle CONSOMAT a été intégré dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050. Il utilise en données d'entrées des volumes de rénovation issus du modèle ANTONIO. Dans la mesure où il projette une demande en matériaux, il pourrait à l'avenir être utilisé dans des bouclages sur la disponibilité des ressources matérielles, si des modèles d'offre étaient disponibles.
	Questions et enjeux	Le modèle pourrait participer à une réflexion sur les enjeux de disponibilité des ressources matérielles et conflits d'usage, et sur des tensions/ruptures d'approvisionnement

A9. USES 2 (ADEME)

Outil		
Modèle / outil	USES 2	<i>USES est un modèle de projection à 2030 des consommations d'énergie des équipements d'électricité spécifique du résidentiel</i>
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	Énergies Demain, E. Toulouse & S. Attali, CREDOC	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Albane GASPARD Animatrice de secteur prospective du bâtiment et de l'immobilier - ADEME	albane.gaspard@ademe.fr
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 22/02/2023 Fiche validée le 09/08/2024.	
Ressources	https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5753-modele-uses-2 NOTICE-TECHNIQUE.html	
Modèle général		
Finalité	Le modèle permet de projeter à 2030, en France métropolitaine, la consommation énergétique moyenne des principaux appareils présents dans les logements. Il recouvre les catégories d'équipements suivantes : froid, lavage, cuisson, entretien et électronique.	
Type d'outil	Modèle bottom-up, modèle de stock	
Champ de modélisation	Le modèle porte spécifiquement sur la trajectoire de consommation d'énergie du secteur résidentiel.	
Usage type / périodicité	USES 2 est la version mise à jour pour <i>Transition(s) 2050</i> , en 2020-2022, d'un modèle USE développé en 2014. Développé par Énergies Demain, Édouard TOULOUSE, Sophie ATTALI et le CRÉDOC. Mis à jour et opéré par Édouard TOULOUSE et Sophie ATTALI pour <i>Transition(s) 2050</i> .	
Architecture	Le modèle se présente sous la forme de plusieurs feuilles Excel reliées entre elles. Chaque feuille permet de réaliser les calculs sur une catégorie d'appareils. Une feuille de résultats agrège les consommations de tous les appareils. Cet ensemble de feuilles permet de projeter les consommations d'un scénario.	
Rythme d'actualisation		
Périmètre technique	Bâtiments	Résidentiel
	Usages	Le modèle couvre 23 catégories d'appareils qui représentent environ 85 % des consommations électrodomestiques totales (hors éclairage, chauffage, ECS, climatisation, ventilation et auxiliaires de chaudières). Il reste donc de l'ordre de 15 % de consommations autres et diverses, qui ont été ajoutées dans le modèle sous la forme d'une ligne « AUTRES », dont l'évolution est modélisée par un simple coefficient d'évolution global par pas de 5 ans. Les usages couverts et leur découpage en catégories sont les suivants :
		<ul style="list-style-type: none"> • Froid (Réfrigérateurs simples, Réfrigérateurs combi, Congélateurs) • Lavage (Lave-linge, Sèche-linge, Lave-vaisselle) • Cuisson (Fours indépendants, Mini-four, Cuisinières, Tables de cuisson, Hottes, Micro-ondes, Petits appareils de la cuisine) • Entretien (Aspirateurs, Fers à repasser) • Électronique (Ecrans, Ordinateurs fixes, Ordinateurs portables, Tablettes, Consoles de jeux, Boxes et décodeurs, Autres appareils mobiles, Capteurs et domotique)
	Population	La population française est décrite sous forme de ménages occupant ces résidences principales
Périmètre géograph.	Échelle	France métropolitaine.
	Territoire	National
Périmètre temporel	Horizon	2030
	Pas temporel	Pas de 5 ans, pour les années 2015, 2020, 2025 et 2030.
Principes de calcul	La consommation énergétique d'une catégorie d'appareils repose principalement sur trois paramètres, qui sont pris en compte dans le modèle USES 2 : <ul style="list-style-type: none"> • le taux d'équipement moyen (nombre d'appareils par ménage), • le comportement moyen d'utilisation (temps d'usage, nombre de cycles, programmes choisis...) • la performance énergétique moyenne du parc d'appareils présents dans les logements. Ce dernier paramètre est le plus délicat à évaluer, car il implique de disposer d'une estimation du contenu et de l'évolution du parc d'appareils, qui dépend à son tour de plusieurs paramètres : les entrées annuelles dans le parc (volumes et caractéristiques des ventes d'appareils, par exemple par classe énergétique) et sorties annuelles du parc (appareils en fin de vie ou renouvelés pour une autre raison).	
Entrées	Taux d'équipement moyen (nombre d'appareils par ménage) Comportement moyen d'utilisation (temps d'usage, nombre de cycles, programmes choisis...) Performance énergétique moyenne du parc d'appareils Entrées annuelles dans le parc Sorties annuelles du parc	
Sorties	Consommation d'énergie finale (électricité, gaz) par équipement	
Éléments de discussion		
Points forts	Modèle très détaillé permettant de calibrer finement chaque équipement	
Questionnements et développements	Le modèle USES 2 tente de représenter le plus fidèlement possible la consommation énergétique des appareils présents dans les logements français. Une telle modélisation est intrinsèquement porteuse de limites et approximations. <ul style="list-style-type: none"> • Le modèle travaille avec des valeurs moyennes, ce qui ne permet pas de restituer toute la subtilité et la multiplicité des spécificités individuelles des appareils et des comportements d'usage ; certaines 	

		<p>corrélations entre paramètres peuvent par ailleurs ne pas être prises en compte (par exemple la relation possible entre capacité d'un lave-linge et nombre de cycles effectués).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les appareils électrodomestiques ayant tendance à devenir de plus en plus sophistiqués (avec de nombreux programmes et modes d'usage possibles), le modèle doit nécessairement recourir à des approximations et ne peut couvrir l'ensemble des paramétrages possibles. • À l'exception des appareils de froid, le modèle ne tient pas compte de l'impact du vieillissement sur les performances énergétiques des appareils ; il existe peu de données disponibles à ce sujet. • Le paramètre «durée de vie moyenne» qui permet de modéliser la manière dont les appareils sortent progressivement du parc ne tient pas compte de toutes les situations particulières possibles (appareils mis dans un coin et encore utilisés sporadiquement, appareils donnés à un proche, appareils revendus ou reconditionnés, etc.). • Le cas des résidences secondaires, où les appareils sont utilisés de manière ponctuelle au cours de l'année, n'est pas traité spécifiquement. <p>Par ailleurs, des réflexions sont en cours pour intégrer cette modélisation dans un ensemble plus large de modélisation des flux d'équipements et biens des ménages français, et prolonger les projections à 2060.</p>
Besoins identifiés	Données	Toute donnée permettant d'améliorer le calibrage Données ou méthode pour estimer les consommations d'appareils qu'on ne connaît pas encore (objets connectés...)
	Méthode	—
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	USES 2 est un outil énergie de simulation exploratoire à visée prospective, fondé sur une description physique bottom-up explicite. Il traite des équipements d'électricité spécifique et de cuisson des résidences principales sur le territoire métropolitain, à l'horizon 2030 et au pas de 5 ans à partir d'un calage en 2015.
	Champs et paramètres	Le modèle représente des ménages , dont il documente les stocks d'équipements ainsi que les usages . Il ne propose pas de diversité de ménages, du fait notamment de l'absence de données d'observation suffisamment fines.
	Chaînages et bouclages	Les résultats du modèle USES 2 ont été intégrés dans le cadre de Transition(s) 2050 dans le modèle ANTONIO, et projetés à 2050. Le modèle intègre des données de projections du nombre de ménages émanant des projections de population de l'INSEE et du SDES. À l'avenir, du fait qu'il documente les flux d'équipements, il pourrait être utilisé dans une perspective de bouclage plus global sur les besoins en matière de la société française. Il pourrait également être utilisé pour documenter les factures d'énergie moyennes des ménages.
	Questions et enjeux	Le modèle permet de représenter les évolutions de mode de vie et leurs incidences sur l'utilisation des équipements électriques et électroniques du quotidien. Il permet notamment d'alimenter la réflexion sur l'évolution des consommations liées au numérique dans les foyers, et sur l'impact de la politique sur l'étiquette énergie. Il n'est cependant pas possible d'aller au-delà des comportements moyens des ménages, et donc de documenter des enjeux comme ceux de la précarité énergétique.

A10. VIVALDI et Data centers (ADEME)

a) VIVALDI

Outil		
Modèle / outil	VIVALDI	
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	ADEME	<p><i>Le modèle VIVALDI projette les consommations d'énergie du secteur tertiaire en France à 2050. Il est basé sur une description des évolutions de la consommation des branches CEREN, et inclus un module spécifique sur les data centers.</i></p>
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Albane GASPARD Animatrice de secteur prospective du bâtiment et de l'immobilier - ADEME Bruno LAFITTE Coordinateur thématique - ADEME	albane.gaspard@ademe.fr bruno.lafitte@ademe.fr
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 22/02/2023. Fiche validée le 09/08/2024.	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	Le modèle permet de projeter à 2050, en France métropolitaine, les consommations d'énergie des différents usages des secteurs tertiaires CEREN et hors CEREN. Les usages inclus dans le modèle sont : le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS), la climatisation, l'électricité spécifique (dont éclairage) et la cuisson. Le modèle permet la prise en compte de tous les usages dans un unique outil intégré. Il est complété de modules spécifiques, notamment sur l'éclairage public et les data centers.	
Type d'outil	Modèle bottom-up qui agrège les consommations unitaires (kWh/m ²) des branches CEREN	
Champ de modélisation	Le modèle porte spécifiquement sur la trajectoire de consommation d'énergie du secteur tertiaire	
Usage type / périodicité	Le modèle n'a été utilisé à ce stade que dans l'exercice <i>Transition(s) 2050</i> .	
Architecture	Fichier Excel constitué d'un onglet par scénario et par branche, puis d'onglets de synthèse et de visualisation des résultats	
Rythme d'actualisation	Seulement utilisé dans <i>Transition(s) 2050</i> .	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre les bâtiments des branches CEREN, à savoir : (1)Bureaux; (2)Cafés-hôtels-restaurants; (3)Commerce; (4)Enseignement-recherche; (5)Habitat communautaire; (6)Santé; (7)Sport, Loisirs, Culture; (8)Transport. Le modèle intègre également les consommations des branches tertiaires hors CEREN, à savoir : (9)Éclairage public; (10)Parties communes d'immeubles; (11)Entrepôts frigorifiques; (12)Armées; (13)Grands centres de recherche; (14)Télécommunication.
	Usages	La décomposition de la consommation d'énergie se fait selon les usages suivants : (1) Chauffage; (2) Eau chaude sanitaire; (3) Cuisson; (4) Autres usages; (5) Électricité spécifique (éclairage, bureautique, froid alimentaire, autres usages); (6) Climatisation.
	Population	-
Périmètre géograph.	Échelle	France métropolitaine
	Territoire	Il fonctionne à la maille nationale et ne comporte pas de désagrégation territoriale.
Périmètre temporel	Horizon	2050
	Pas temporel	Pas de temps de 10 ans (2015-2020, puis 2020-2030, 2030-2040 et 2040-2050).
Principes de calcul	Le modèle est structuré par branche CEREN, chacune faisant l'objet d'une feuille de calcul spécifique. Pour chaque branche, il permet d'explorer les leviers d'action de transition énergétique suivants : <ul style="list-style-type: none"> • Variation des surfaces chauffées • Changement de vecteur énergétique (lorsque pertinent) • Évolution de la consommation unitaire (au m²) pour chaque usage. Les résultats par branche CEREN sont ensuite agrégés pour produire la consommation totale, par vecteur énergétique et par usage, du tertiaire CEREN. S'y ajoute la consommation des secteurs hors CEREN pour obtenir la consommation totale du secteur tertiaire. Un module spécifique couvre les data centers de colocation (hors serveurs d'entreprise). La feuille de calcul permet de faire varier, par taille de data centers : (1)le volume de données traitées(EB); (2)l'efficacité énergétique (GWh/EB); (3)le PUE. Le module de calcul distingue les serveurs considérés comme petits/moyens (surface < 2 500 m ²) et les serveurs considérés comme gros/hyperscale(surface > 2 500 m ²).	
Entrées	Consommation unitaire Surfaces neuves Taux de rénovation des surfaces existantes Part des vecteurs énergétiques	
Sorties	Consommation (énergie finale) par branche, par usage et par vecteur énergétique.	
Éléments de discussion		
Points forts	Intègre l'ensemble des usages et des branches tertiaires. Concernant spécifiquement le module relatif aux data centers, il s'agit de la première projection de ce type à notre connaissance en France (sur une branche d'activité à fort enjeu du point de vue de l'évolution des consommations).	

Questionnements et développements	<p>Le modèle ne permet pas de projeter les consommations à une échelle infranationale.</p> <p>Le modèle n'intègre pas de façon endogène la prise de décision des maîtres d'ouvrage ou des occupants.</p> <p>C'est au modélisateur qu'il revient de paramétriser les évolutions. Par exemple, la décision de rénover énergétiquement un bâtiment n'est pas la résultante d'équations micro-économiques de prise de décision dépendant du prix relatif des énergies ou des équipements. Le modélisateur détermine hors du modèle la dynamique de rénovation, et ajuste les paramétrages (proportion de bâtiments suivant la dynamique du décret Eco-Energie tertiaire, rythme de changements des vecteurs énergétiques...) en conséquence.</p> <p>Repose sur les données du CEREN, qui ne sont pas publiques, ce qui limite la possibilité de partager le modèle.</p> <p>Le modèle ne permet pas de différencier les trajectoires de consommation par sous-branche. Alors que certaines branches tertiaires (comme par exemple le commerce) pourraient connaître des évolutions contrastées (développement du e-commerce, baisse de fréquentation des grandes surfaces, développement du petit commerce de centre-ville...), le modèle VIVALDI ne peut capter que l'évolution globale d'une branche tertiaire.</p> <p>Le modèle ne permet pas de projeter des évolutions de surface en fonction de données d'activité économique.</p> <p>Des évolutions sont en cours pour prolonger le modèle à 2060 et lui permettre de mieux représenter l'impact du Dispositif Eco-Energie Tertiaire. Par ailleurs, des développements complémentaires sont prévus pour réaliser un modèle spécifique aux data centers.</p>
Besoins identifiés	<p>Données</p> <p>Données fines sur la part des surfaces concernées par le dispositif éco-énergie tertiaire dans chaque branche.</p> <p>Données de consommation par sous-branche (ex : pour différencier les différents types de commerce).</p>

Positionnement dans la cartographie	
	Outils et modèles Il s'agit d'un outil énergie de simulation exploratoire à visée plutôt normative, fondé sur une description par branche tertiaire. Il traite l'ensemble du secteur tertiaire et couvre tous les usages de l'énergie à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050, au pas de dix ans.
	Champs et paramètres L'unité fonctionnelle du modèle est le mètre carré de surface chauffée des branches CEREN. La caractérisation par surface chauffée ne permet pas de documenter directement l'artificialisation des sols associée à la construction neuve.
	Chaînages et bouclages Le modèle VIVALDI constitue, avec son pendant ANTONIO pour le résidentiel, le pivot de la suite d'outils mobilisés par l'ADEME pour la modélisation du secteur des bâtiments. À ce titre, il est connecté ou connectable avec de nombreux autres outils. Le modèle s'alimente des résultats des projections de population globale et de population active de l'INSEE, et l'outil MICO pour la climatisation. Enfin, le modèle est ou peut être mis en relation avec de nombreux outils permettant respectivement : <ul style="list-style-type: none">• d'informer les liens avec les besoins en ressources, qu'il s'agisse de compétences et d'emplois (TETE), d'investissements (données d'I4CE) ou de matières premières (CONSOMAT, RECOMAT) ;• de traiter les enjeux intersectoriels, par exemple avec le système électrique(via Artelys Crystal Super Grid) ou l'industrie(Pépit0) ;• d'évaluer différents impacts environnementaux (Modèle déchets, MatMat à l'avenir pour l'empreinte matière et carbone, Modèle artificialisation du CGDD...) ou socio-économiques(ThreeME...).
	Questions et enjeux Le modèle permet de capter des évolutions liées à la démographie (vieillissement de la population, évolution de la population en âge d'aller à l'école...), au numérique (data centers), aux modes de vie (évolution du commerce). Cependant, sa représentation par branche et non sous-branche (ex: différencier les surfaces d'école de celles de l'enseignement supérieur...) ne lui permet pas de documenter finement les dynamiques.

b) Data Centers

Outil		
Modèle / outil	Modèle Data centers (nom à venir)	<i>Modélisation prospective des consommations d'énergie liées aux data centers</i>
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	En cours de recrutement	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Bruno LAFITTE Coordinateur thématique - ADEME	bruno.lafitte@ademe.fr
Prise d'information	Fiche validée le 13/08/2024.	
Ressources	-	
Modèle général		
Finalité	Cet outil est en cours de développement. Il vise à projeter certains impacts environnementaux des data centers en France à l'horizon 2060 (énergie, carbone, foncier, eau...).	
	Ce nouvel outil vise à améliorer l'outil existant, qui ne prenait pas en compte :	
	<ul style="list-style-type: none"> • Les data centers hébergés dans des bâtiments tertiaires avec une activité autre • Les applications sous-jacentes à l'augmentation du volume de données • La réutilisation de la chaleur fatale produite par les data centers • L'impact des exigences de souveraineté numérique 	

	<ul style="list-style-type: none"> L'impact des règlementations et incitations européennes sur les data centers (directive sur l'efficacité énergétique, pacte relatif à l'intelligence artificielle) Les impacts environnementaux autres que la consommation d'énergie notamment la consommation d'eau et de foncier
Type d'outil	Outil Excel
Champ de modélisation	-
Usage type / périodicité	-
Architecture	En cours de construction
Rythme d'actualisation	-.
Périmètre technique	<p>Bâtiments</p> <p>Data centers hébergés en France</p> <ul style="list-style-type: none"> Edge computing data center. Hyperscales. Colocation data center. Data centers hub. Data centers d'entreprises/collectivités.
Usages	-
Population	-
Périmètre géograph.	<p>Échelle Nationale</p> <p>Territoire France métropolitaine</p>
Périmètre temporel	<p>Horizon 2060</p> <p>Pas temporel 10 ans</p>
Principes de calcul	En cours de construction
Entrées	<p>Les types de variables prévues sont, a minima :</p> <ul style="list-style-type: none"> Le volume de données. Le PUE (Power Usage Effectiveness) Le ratio entre types de data center. L'efficacité énergétique du traitement et stockage des données. Le ratio entre les types de refroidissement (CRAC/CRAH/par liquide/par immersion/par géothermie...). La consommation moyenne annuelle d'eau en Litres par kWh. Le volume d'énergie issu de la récupération de la chaleur fatale. Le taux d'émission en équivalent CO2 du kWh en France et à l'étranger (pour les données traitées à l'étranger) <p>Certaines variables qui pourraient être modifiées facilement par l'utilisateur, sont a minima :</p> <ul style="list-style-type: none"> L'évolution du volume global de données. Le ratio entre le type de données demandant un calcul intensif (IA, HPC, data mining ...) et le streaming voire stockage. L'efficacité énergétique du traitement et stockage des données. Le PUE (Power Usage Effectiveness) La consommation moyenne annuelle d'eau en Litres par kWh. Le taux d'émission en équivalent CO2 du kWh en France et à l'étranger (pour les données traitées à l'étranger)
Sorties	<p>Les sorties de l'outil porteront sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> L'évolution de la consommation énergétique en TWh des data centers jusqu'en 2060 pour chaque scénario, puis pour les 5 scénarios comparés, par type de data centers. L'évolution de l'émission d'équivalent CO2 pour chaque scénario, puis pour les 5 scénarios comparés, par type de data centers. L'évolution du volume d'énergie récupérée sous forme de chaleur fatale jusqu'en 2060 pour chaque scénario, puis pour les 5 scénarios comparés. L'évolution de la consommation d'eau en L/kWh jusqu'en 2060 pour chaque scénario, puis pour les 5 scénarios comparés.
Éléments de discussion	
Points forts	Prise en compte d'un ensemble d'impacts environnementaux (au-delà de la consommation d'énergie et des émissions carbone)
Questionnements et développements	-
Besoins identifiés	<p>Données -</p> <p>Méthode -</p>

A11. Artelys Crystal Super Grid (Artelys)

Outil		
Modèle / outil	Artelys Crystal Super Grid	<i>Ce modèle propose une simulation et une optimisation technico-économique de la trajectoire énergétique, et de l'évolution des réseaux, intégrant la demande des bâtiments des secteurs résidentiel et tertiaire.</i>
Porteur(s)	Artelys	
Développeur(s)	Artelys	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Maxime CHAMMAS Directeur de projet - Artelys Lucie LEFORT Cheffe de projet énergie - Artelys	maxime.chammas@artelys.com lucie.lefort@artelys.com
Prise d'information	Entretien conduit le 30/03/2023. Compléments apportés par les auteurs le 18/11/2023. Fiche validée le 26/07/2024.	
Ressources	https://www.artelys.com/fr/artelys-crystal/super-grid/	
Modèle général		
Finalité	Cet outil est d'une manière générale destiné à éclairer des enjeux de planification des systèmes énergétiques interconnectés, avec une attention particulière pour le système électrique. Dans le cadre d'un exercice de scénario énergétique global, il peut être utilisé pour évaluer les enjeux d'équilibre entre offre et demande, en lien avec différentes trajectoires de consommation ou différentes hypothèses sur le mix de production. C'est dans ce sens qu'il a été utilisé, en projetant notamment les enjeux associés à l'évolution des secteurs résidentiel et tertiaire, pour l'exercice Transition(s) 2050 de l'ADEME.	
Type d'outil	Artelys Crystal Super Grid est un outil de simulation et d'optimisation des systèmes interconnectés destiné à informer la planification multi-énergie (électricité, gaz, chaleur, hydrogène...) de tels systèmes.	
Champ de modélisation	Le logiciel Artelys Crystal Super Grid propose une représentation de systèmes énergétiques interconnectés, incluant production transport, consommation et stockage. Dans le cadre de l'exercice Transition(s) 2050 de l'ADEME, il a été utilisé pour modéliser le système électrique à l'échelle européenne, avec une modélisation régionalisée de la France, de manière à évaluer des trajectoires de demande, de production, et de besoins relatifs au réseau électrique et aux moyens d'équilibrage.	
Usage type / périodicité	Dans le cadre de l'exercice <i>Transition(s) 2050</i> , cet outil a servi à l'évaluation de la robustesse des scénarios sur l'équilibre offre-demande, intégrant des éléments spécifiques d'optimisation. Dans ce type d'utilisation, il permet notamment d'évaluer, dans les scénarios retenus : <ul style="list-style-type: none"> • l'évolution de la consommation d'électricité et de son degré de pilotabilité ; • l'évolution des capacités électriques installées (en particulier, renouvelables et nucléaires) ; • l'optimisation économique du réseau inter-régional et des moyens de flexibilité. <p>Cette modélisation s'applique à l'ensemble du système mais permet un traitement spécifique détaillé du secteur du bâtiment.</p> <p>Cet outil peut aussi être utilisé par exemple pour des analyses coût-bénéfice de projets d'interconnexion, des études de dimensionnement de capacités de pointe, des optimisations de mix énergétique ou de portefeuille de flexibilité, des évaluations de l'évolution des prix de l'électricité...</p>	
Architecture	L'outil fonctionne selon une logique de description du modèle énergétique sous forme d'éléments unitaires, ou « assets », dont le fonctionnement est décrit avec une granularité paramétrable, la plupart du temps horaire, et les interactions avec les autres éléments régies par un système d'équations complexe. L'outil intègre parallèlement plusieurs dizaines d'indicateurs de performance, couvrant le fonctionnement du système, la performance technique des différents éléments, les coûts associés aux productions ou à différents services, et les émissions de CO ₂ .	
Rythme d'actualisation	Le logiciel propose une approche modulable, avec une librairie de modèles adaptés à différents usages et une possibilité de gestion multi-modèles, l'ensemble faisant l'objet d'un développement continu. Il est utilisé par des clients très divers et se trouve notamment à la source du modèle multi-énergies METIS de la Commission européenne.	
Périmètre technique	Bâtiments	L'outil n'est pas centré sur la demande ni le secteur des bâtiments mais la modélisation couvre l'ensemble des consommations du secteur résidentiel et du secteur tertiaire.
	Usages	La demande d'énergie des bâtiments prise en compte couvre l'ensemble des usages.
	Population	La modélisation couvre l'ensemble de la population, dans ses différentes contributions à la demande (ménages, actifs, usagers...), et permet de prendre en compte des hypothèses démographiques, mais ne développe pas de description spécifique de cette dimension.
Périmètre géographique	Échelle	L'outil étant modulaire, il peut fonctionner à différentes échelles géographiques. Le plus fréquemment il est utilisé à la maille régionale, nationale ou zone de marché, en prenant en compte les interactions entre zones voisines.
	Territoire	Dans le cadre de <i>Transition(s) 2050</i> , l'outil couvre l'ensemble de la France métropolitaine à la maille régionale, et le reste de l'Europe à la maille nationale.
Périmètre temporel	Horizon	Le logiciel n'est pas limité dans son horizon temporel. Il a été utilisé dans le cadre de <i>Transition(s) 2050</i> à l'horizon 2060.
	Pas temporel	L'outil produit pour une année donnée une évaluation construite au pas horaire. Il n'est limité dans le nombre d'années considéré que par le volume de calcul associé. Dans le cadre de <i>Transition(s) 2050</i> , il a fourni des données annuelles au pas de cinq ans entre 2020 et 2060.
Principes de calcul	L'outil propose essentiellement une optimisation simultanée de l'investissement et de l'opération horaire du système (production, réseau, moyens de flexibilité), pour <i>Transition(s) 2050</i> sur la période 2020-2060, de manière à minimiser les coûts d'opération et d'investissement, sous contrainte d'équilibre offre-demande, le cas échéant en espérance sur les aléas climatiques.	
Entrées	Pour établir le type de calcul demandé au logiciel dans le cadre d'un exercice prospectif comme <i>Transition(s) 2050</i> , celui-ci a besoin des entrées suivantes :	

		<ul style="list-style-type: none"> consommation par usage et par vecteur sur la trajectoire ; flexibilité des consommations par usage sur la trajectoire ; coûts des combustibles et du CO₂ ; gisements et évolution des coûts pour chaque option d'investissement. <p>Dans le cadre précis de Transition(s) 2050, des données d'entrée supplémentaires ont été utilisées :</p> <ul style="list-style-type: none"> cibles de capacité installée en 2050) ; cibles de gaz consommé pour l'électricité et d'hydrogène produit par électrolyse.
Sorties		<p>En retour, après l'exercice de simulation et le calcul d'optimisation, l'outil fournit des éléments relatifs aux différents indicateurs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> les niveaux d'investissement nécessaires pour atteindre les cibles de capacité et répondre aux besoins de flexibilité (batterie, power-to-gas, capacités de pointe) et d'adaptation du réseau de transport au niveau interrégional ; l'opération du système énergétique, au pas de temps horaire, calculée dans cet exercice pour neuf années de trajectoire (de 2020 à 2060, de cinq ans en cinq ans), chacune étant simulée pour 9 années climatiques différentes ; le niveau d'appel à des capacités de pointe thermique, le degré de défaillance, et inversement le niveau d'utilisation des électrolyseurs et les surplus de production ; les émissions de gaz à effet de serre.
Éléments de discussion		
Points forts		<p>Les principaux points forts du modèle concernent sa capacité de modélisation du dispatch optimal en fonction des contraintes fixées, son caractère multi-énergie, et sa fonction d'optimisation de trajectoire du point de vue des capacités et des coûts.</p> <p>Sa structure, basée sur une librairie d'objets modélisés et sur une librairie intégrée d'indicateurs et d'outils, offre par ailleurs une grande flexibilité d'utilisation et facilité d'analyse.</p> <p>Le modèle intègre une représentation fine des flexibilités de la demande, basée sur un modèle spécifique de demande et de flexibilité pour chaque usage considéré, incluant le chauffage et la climatisation, les pompes à chaleur (PAC) hybrides (effaçables en période de grand froid), l'eau chaude sanitaire (ECS) et les produits blancs, ou les véhicules électriques.</p> <p>La modélisation prend en compte la variabilité météorologique : les optimisations sont réalisées en espérance en minimisant les coûts en moyenne sur neuf scénarios météo appliqués à toutes les années modélisées. Ces scénarios, correspondant aux conditions observées pendant les années 2011 à 2019, ont été produits par l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) pour décrire l'impact sur les productions renouvelables et sur les consommations thermosensibles (chauffage et climatisation).</p>
Questionnements et développements		<p>L'optimisation porte sur une minimisation des coûts totaux. Celle-ci se fait au périmètre de l'ensemble des coûts d'investissement et de fonctionnement (Capex et Opex), et peut intégrer des contraintes telles que des cibles prédéfinies pour certains moyens de production, ou des inputs en termes de consommation. Elle inclut des éléments de coûts relatifs aux réseaux. Le réseau de transport interrégional est directement représenté via les interconnexions / capacités d'échange entre régions, mais le réseau de transport à l'intérieur de chaque région et le réseau de distribution ne le sont pas : les impacts liés à ce niveau à la consommation ou au déploiement des énergies renouvelables sont approximés dans un traitement ex-post.</p> <p>La seule externalité couverte concerne les émissions de CO₂, intégrées à l'optimisation via un coût associé qui ressemble au prix du Emissions Trading System (ETS). Le modèle n'intègre pas d'autre externalité telle que l'usage des sols.</p> <p>L'optimisation réalisée est, dans le cas de l'exercice <i>Transition(s) 2050</i>, de type omniscient, c'est-à-dire qu'elle arbitre à tout moment l'état du système en anticipant sur le reste de l'année, et en anticipant sur l'ensemble des années. Cela ne reflète pas des situations de prise de décision réelles, mais permet de traiter différents sujets en analyse de sensibilité, comme par exemple l'impact du réchauffement climatique sur l'hydroélectricité ou le nucléaire, ou de représenter des situations d'indisponibilité sans optimiser pour les comparer au coût optimisé – et de croiser le tout avec les projections de demande par exemple.</p> <p>Le logiciel <i>Artelys Crystal Super Grid</i> ne fait pas de modélisation spécifique du secteur des bâtiments. Dans le cas de <i>Transition(s) 2050</i>, il fonctionne par approximation à partir d'un travail très fin dont il ne peut pas reproduire le détail. L'enjeu, en regard de l'objectif de cet outil, est de reconstituer à partir des volumes de demande calculés par l'ADEME des profils de charge.</p> <p>Ces profils sont établis à partir de consommations annuelles finales d'énergie, et plus spécifiquement de leur part électrique, par usage et par secteur. Les taux de pilotage de la demande peuvent être appliqués selon les usages, et des besoins spécifiques tels que la production d'H₂ peuvent être introduits. Ils sont typiquement construits selon une approche mixte, bottom-up pour des usages clés tels que les véhicules électriques ou les PAC, et top-down pour les usages trop agrégés, en s'appuyant alors essentiellement sur les données historiques.</p> <p>Pour le chauffage, les profils intègrent un apprentissage sur la thermosensibilité à partir des historiques, et distinguent des profils séparés pour les PAC et le chauffage électrique par effet Joule.</p> <p>Pour les besoins du modèle, les données d'entrée sur la demande au niveau national doivent par ailleurs être désagrégées par région. Le modèle s'appuie pour cela sur des clés assez simples, reposant sur l'évolution de la population par région, et une désagrégation des besoins thermiques en degrés jours régionaux. Concernant la projection de l'évolution de la population par région, les clés de répartition utilisées par le modèle ne recoupent pas forcément les hypothèses et paramètres retenus dans les scénarios de l'ADEME, mais l'écart a été jugé acceptable – et un recouplement reste possible.</p> <p>S'agissant de la thermosensibilité, l'historique de la consommation permet de capter une évolution par région, et de tenir indirectement compte par là même de l'évolution climatique et des spécificités des bâtiments.</p>
Besoins identifiés	Données	<p>Dans son utilisation faite pour l'étude ADEME <i>Transition(s) 2050</i>, l'outil couvre la France métropolitaine. Il existe différentes études du même type sur des territoires d'outre-mer et dans de nombreux autres pays en Europe ou hors Europe (<i>Artelys</i> a notamment travaillé sur la Martinique et sur la Réunion), mais la difficulté principale est de disposer des bonnes données. Il manque par exemple typiquement le profil horaire de l'ensemble de la demande, d'autant que les modèles sont historiquement axés sur la production.</p>

Méthode	Concernant la variabilité météorologique, des analyses complémentaires utilisant des données climatiques intégrant le réchauffement climatique ont été réalisées.
Positionnement dans la cartographie	
Outils et modèles	 <p>Le modèle Artelys Crystal Super Grid est un outil de simulation et d'optimisation du système énergétique orienté réseaux, qui ne porte pas spécifiquement sur le bâtiment mais permet d'intégrer de façon fine les enjeux liés à la demande d'énergie de ce secteur, notamment par la présence d'actif dédiés à la modélisation de certains usages et de la flexibilité qu'ils peuvent apporter au système.</p>
Champs et paramètres	 <p>Cet outil intervient pour l'essentiel sur la dimension des consommations d'énergie, avec une extension à celle des émissions de gaz à effet de serre du fait d'un lien avec le système de production d'énergie. Il capte pour cela des éléments descriptifs relatifs aux usages et aux bâtiments eux-mêmes, mais reste dans ces champs à un niveau relativement agrégé en termes d'unités fonctionnelles et de leviers d'action envisagés, ceux-ci intervenant pour l'essentiel de façon exogène dans une formation de la demande que le modèle considère in fine.</p>
Chaînages et bouclages	 <p>Le modèle intervient dans le système complet de modélisation mobilisé par l'ADEME, et permet une forme de bouclage entre le secteur du bâtiment et celui de l'énergie au prisme des consommations d'énergie et des émissions, mais ce bouclage reste peu détaillé et peu intégratif. En particulier, l'optimisation appliquée par cet outil du point de vue de l'énergie peut faire remonter une information sur l'évolution des bâtiments et de leur usage, mais ne permet pas d'élargir à d'autres aspects relatifs aux bâtiments la démarche d'optimisation.</p>
Questions et enjeux	 <p>Cet outil de modélisation à l'échelle nationale est construit pour intégrer différents facteurs prospectifs relatifs à la démographie, à la demande et à l'offre qu'ils traitent toutefois selon une perspective relative à l'énergie et aux réseaux, et pas spécifiquement aux bâtiments. Il se prête assez peu à l'exploration de nouveaux questionnements techniques, socio-économiques ou sociétaux – même s'il permet de couvrir à travers certains proxy des aspects tels que la sensibilité aux évolutions climatiques –, et encore moins à traiter des enjeux relatifs aux crises. Il permet en revanche dans une certaine mesure, par sa structure régionalisée et son application possible à différents territoires, de prendre en compte une part de différenciation territoriale et de couvrir des territoires non métropolitains.</p>

A12. Outils territoriaux (Artelys)

Outil		
Modèle / outil	Outils territoriaux (Artelys Crystal City, Artelys Crystal Next Grid, CEPIA)	<i>Sur la base d'une structure commune, ces outils déclinent différentes solutions de simulation et d'aide à la décision pour la planification sur de nombreuses dimensions des trajectoires énergétiques à destination des territoires.</i>
Porteur(s)	Artelys	
Développeur(s)	Artelys	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Maxime CHAMMAS Directeur de projet - Artelys Lucie LEFORT Cheffe de projet énergie - Artelys	maxime.chammas@artelys.com lucie.lefort@artelys.com
Prise d'information	Entretien conduit le 30/03/2023. Compléments apportés par les auteurs le 18/11/2023. Fiche validée le 25/07/2024.	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	Artelys développe, à partir d'une structure commune, différents outils adaptés aux besoins de modélisation pour répondre aux enjeux des collectivités, par exemple pour l'élaboration des schémas directeurs énergies.	
Type d'outil	Il s'agit globalement d'outils de caractérisation et de simulation de trajectoires énergétiques à l'échelle des collectivités.	
Champ de modélisation	Les outils de cette famille portent globalement sur l'ensemble des consommations et des productions d'énergie à l'échelle de territoires, et sur les émissions de gaz à effet de serre associées.	
Usage type / périodicité	<p>Les outils développés par Artelys dans ce registre visent à répondre à différents enjeux des collectivités liés à leur trajectoire énergétique, comme :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la bonne connaissance du territoire, en identifiant les secteurs les plus consommateurs, les logements les plus énergivores, ou en caractérisant les importations d'énergie ; • la coordination des politiques publiques, en éclairant les effets croisés entre politiques de l'énergie, de la mobilité, et les impacts des projets d'aménagement, l'évolution des réseaux, les impacts des plans de déplacement urbain, etc. ; • l'anticipation, en fournissant des évaluations sur l'intérêt territorialisé de développement de réseaux de chauffage urbain, de mobilisation de nouvelles sources d'énergie, d'intégration des réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur. <p>Ces outils peuvent être déployés dans une perspective territoriale, pour informer la planification énergétique par exemple, ou pour remonter une vision territorialisée à l'échelle nationale : c'est le cas de l'outil GÉODIP, développé par Artelys pour l'ADEME et l'Observatoire national de la précarité énergétique (ONPE), qui vise à établir un diagnostic de la précarité énergétique à l'échelle nationale à parti d'une caractérisation à la maille IRIS.</p>	
Architecture	<p>Ces outils se fondent généralement sur une caractérisation précise au niveau territorial des productions d'énergie, des importations et exportations d'énergie au périmètre géographique choisi, et de la consommation d'énergie, afin de projeter dans des modules de calcul la simulation de différentes évolutions.</p> <p>Généralement écrits en langage Python pour faciliter leur évolution et leur flexibilité d'usage, ils peuvent dans certains cas s'appuyer, pour la visualisation des résultats, sur l'interface web Artelys Crystal ou sur des outils dérivés.</p>	
Rythme d'actualisation	Il n'est pas précisé, et peut être variable en fonction des besoins.	
Périmètre technique	Bâtiments	L'outil est paramétré pour prendre en compte, en fonction du périmètre auquel on le fait travailler, l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires des territoires auxquels on l'applique.
	Usages	De même, en fonction de son application, l'outil est paramétré pour pouvoir prendre en compte l'ensemble des usages, avec un niveau d'agrégation ou de désagrégation adapté aux données disponibles.
	Population	La population n'est pas directement représentée par le modèle, qui caractérise et projette des nombres de logements et d'emplois par branche, mais elle est ainsi indirectement prise en compte au périmètre géographique considéré par les outils. Des données sur le revenu des ménages sont cependant spécifiquement intégrées pour l'évaluation de la précarité énergétique.
Périmètre géograph.	Échelle	Les applications développées sur la base commune de cette approche de modélisation territoriale fonctionnent à la maille IRIS, avec des applications développées à l'échelle de collectivités comme dans une perspective nationale.
	Territoire	Les outils correspondants couvrent potentiellement tout territoire où les données disponibles sont suffisantes pour les alimenter, soit à minima pour tout territoire en France métropolitaine. La question de leur application aux territoires d'outre-mer n'a pas été spécifiquement abordée.
Périmètre temporel	Horizon	Dans son principe de modélisation, l'outil fournit une simulation à l'horizon de temps choisi, sans limitation particulière. Il est toutefois calibré, sur le plan des politiques prédefinies, pour fournir aux collectivités une évaluation de trajectoires aux horizons 2030 et 2050.
	Pas temporel	La modélisation dans Artelys Crystal City fonctionne au pas annuel, avec une possibilité de projeter une évolution sur plusieurs années, sans limitation particulière autre que le volume de calcul (et la précision des données nécessaires).
Principes de calcul	<p>Les outils reposent sur une décomposition fine de la fourniture d'énergie et de la consommation par usage et par secteur.</p> <p>Ainsi un modèle de consommations détaillés par secteur, par usage et par énergie est construit à la maille IRIS en s'appuyant sur un large ensemble de données spécifiques au territoire étudié.</p>	

		Ces modèles de consommations détaillés permettent de scénariser de manière détaillée les consommations énergétiques, d'analyser les évolutions d'une année de référence à une autre ou de comparer des évolutions projetées entre elles. L'outil vise en particulier, à travers la simulation, à calculer un ensemble d'indicateurs pour permettre cette analyse. Il fournit notamment des consommations d'énergie corrigées du climat, des données en émissions (CO ₂ , particules fines, NOx), des données liées à la facture énergétique du territoire, ou des différentes parties du territoire, et des indicateurs relatifs à la comparaison de la facture énergétique et du revenu des ménages, permettant notamment d'analyser le niveau de précarité énergétique.
Entrées		Les outils s'appuient sur différentes bases pour caractériser la structure de production et la structure de consommation à la maille de chaque IRIS du territoire auxquels ils sont appliqués. Notamment, l'outil est généralement paramétré en s'appuyant sur les données de l'observatoire énergétique régional du territoire considéré mais également en prenant en compte une description socio-économique du parc actuel (données INSEE, données CEREN, études ADEME, etc.). Les données d'entrée doivent aussi comprendre, pour permettre le calcul des indicateurs de sortie, des données sur les facteurs d'émission des différentes technologies, ainsi que des données sur le coût des énergies et des hypothèses sur leur évolution.
Sorties		Les principaux indicateurs fournis par ces outils sont la consommation d'énergie, corrigée du climat, les émissions de CO ₂ et les émissions de particules en suspension ou de NOx, les coûts et les factures liées à l'énergie au périmètre choisi, et le niveau de précarité énergétique.
Éléments de discussion		
Points forts		La flexibilité de l'outil permet de l'adapter à différents enjeux, d'ajuster son niveau de désagrégation en fonction des données disponibles, et d'articuler une description fine à la maille IRIS avec une cartographie à l'échelle nationale.
Questionnements et développements		Ces outils reposent pour beaucoup sur un gros travail de décomposition des consommations. Souvent les données sont disponibles à la maille IRIS, par grande catégorie, et parfois à un niveau un peu plus fin (notamment via les Observatoires de l'énergie régionaux). Les données prennent en compte une décomposition par usage et intègrent pour le résidentiel des données sur le parc de logements, et pour le tertiaire des données sur le type et le volume d'activité. Les usages tertiaires sont basés sur une typologie de base SIRET, avec une décomposition selon les usages connus et une catégorie regroupant les «autres usages». Le niveau de désagrégation n'est pas figé en entrée des modèles, ce qui permet de renseigner plus finement des usages en entrée lorsque les données existent. Le parc de bâtiments est décrit par année de construction selon des données INSEE. Le modèle permet une utilisation en mode diagnostic et scénarisation de trajectoires possibles: typiquement, par exemple, il est utilisé pour proposer trois scénarios contrastés aux collectivités, avec des échéances à 2030 et 2050 (ou autre) et un portefeuille d'actions – par exemple, sur la rénovation, avec un certain taux, pour un certain coût ou avec un certain niveau de performance atteint. Plus généralement, le modèle permet de proposer différentes actions, auxquelles sont associées des économies d'énergie. L'outil ne permet toutefois pas d'intégrer directement dans cette modélisation des effets intersectoriels. Il faut de plus retravailler les données – par exemple les courbes de charge basées sur des profils de charge historiques – pour prendre en compte des phénomènes récents tels que le télétravail.
Besoins identifiés	Données	—
	Méthode	—
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	Les différents outils déclinés par Artelys dans cette gamme territoriale s'inscrivent tous dans le registre de l'aide à la décision par la simulation de trajectoires. Cette simulation se construit autour d'une description centrée sur l'énergie, qui intègre selon les déclinaisons une caractérisation plus ou moins fine et complète de la trajectoire bâtimentaire, à différents pas et horizons de temps, et couvrant plus ou moins de paramètres relatifs aux consommations, aux usages et aux impacts.
	Champs et paramètres	La déclinaison d'outils territorialisés repose principalement sur la description aux fins de simulation et de planification de la dimension relative aux consommations d'énergie des bâtiments. Celle-ci peut recouvrir l'ensemble des consommations du secteur résidentiel et du secteur tertiaire, et peut aller, grâce à la flexibilité de l'approche, dans un niveau de désagrégation important. Cette dimension est renseignée par, et peut renseigner en retour différents paramètres relevant des dimensions infra ou supra, qu'il s'agisse dans le premier cas de la caractérisation des usages ou de la typologie des bâtiments, et dans le second d'éléments relatifs à la démographie ou aux coûts, ces aspects étant toutefois couverts de façon plus agrégée.
	Chaînages et bouclages	L'échange n'a pas porté spécifiquement sur cette dimension, si bien qu'aucun chaînage ou bouclage déjà mis en œuvre n'ont été identifiés. On peut toutefois noter que la nature descriptive, modulaire et flexible des outils concernés se prête assez bien à leur articulation avec différents modèles dès lors qu'ils sont eux-mêmes suffisamment descriptifs et désagrégés.
	Questions et enjeux	L'approche développée avec ces outils vise plutôt une application territoriale, ce qui peut apporter des réponses à des questionnements relatifs à la différenciation par territoire, ou permettre le traitement de territoires spécifiques, mais elle peut aussi s'appliquer à une vision remontant de l'échelle territoriale vers le national. Le caractère flexible de l'approche peut dès lors capter par exemple certains enjeux relatifs aux dimensions sociales. Toutefois, d'une manière générale, ces outils sont pour l'essentiel construits dans l'optique de décliner des facteurs prospectifs bien identifiés et bien couverts à l'échelle territoriale, plutôt que celle d'explorer de nouveaux enjeux prospectifs.

A13. Modèle SnW (Association négaWatt)

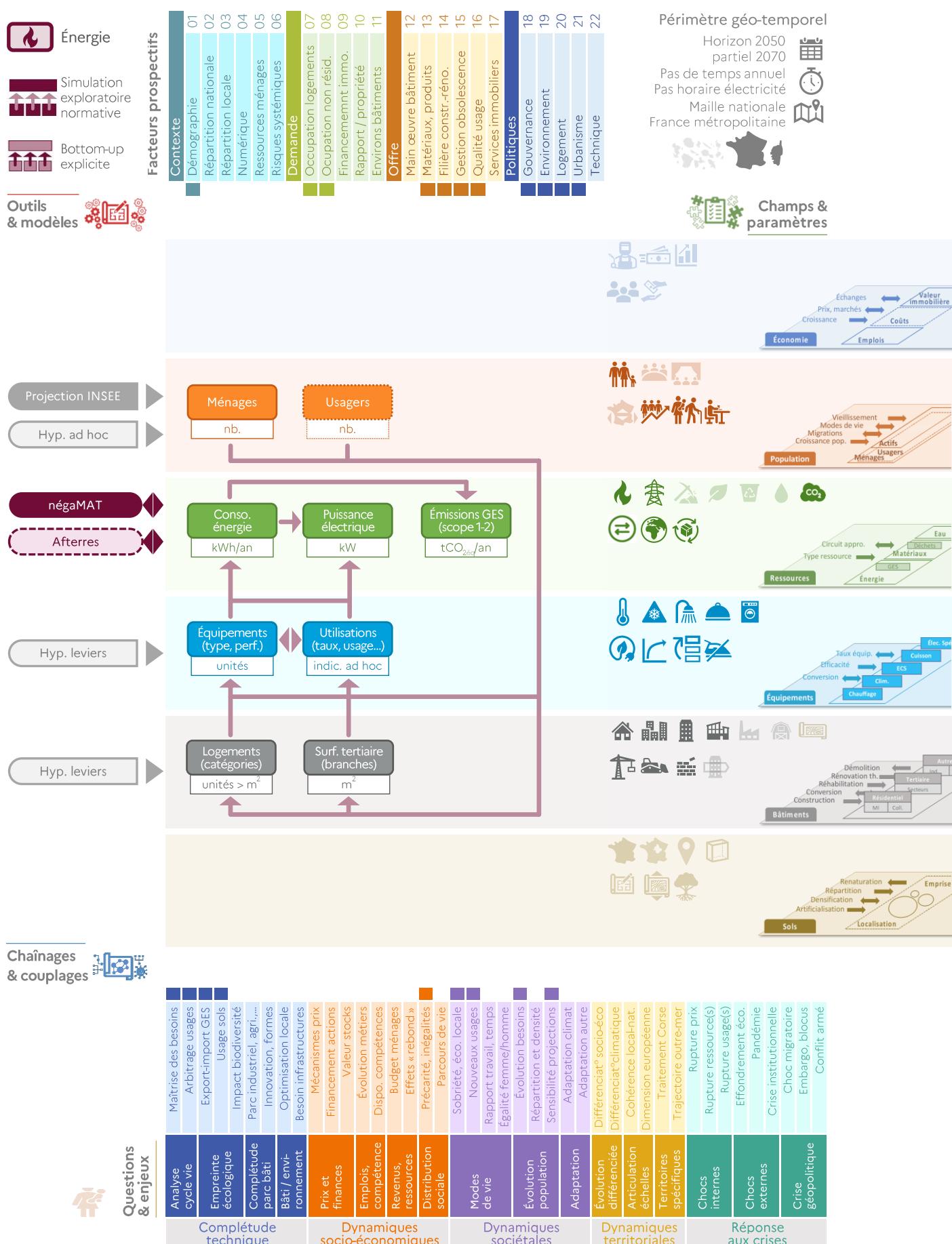
Outil		
Modèle / outil	Modèle SnW (pas de nom)	Ce modèle comporte deux modules portant respectivement sur le résidentiel et le tertiaire, intégrés dans une modélisation complète du système énergétique, utilisée pour la construction du scénario négaWatt.
Porteur(s)	Association négaWatt	
Développeur(s)	Idem	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Thomas LETZ Coordinateur du modèle - Association négaWatt Thierry RIESER Contributeur aux modules bâtiments - Enertech	thomas.letz@negawatt.org rieser@enertech.fr
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 21/02/2023 – relue le 10/03/2023. Revue et complétée par les auteurs, finalisée le 24/10/2023. Fiche validée le 17/10/2024.	
Ressources	Information générale sur le Scénario négaWatt et sa méthode : https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022	
Modèle général		
Finalité	<p>Le modèle est développé pour produire les scénarios de l'Association négaWatt. Il n'a plus grand-chose à voir avec le modèle très simple utilisé pour le premier scénario, publié en 2003, et s'est considérablement enrichi au fil des quatre exercices suivants, mais reste fidèle aux fondamentaux initiaux. Chaque version a fait l'objet d'approfondissements, raffinements et compléments. Le modèle décrit ici est celui du 5^e scénario négaWatt, publié en 2021.</p> <p>En lien avec l'objectif de démonstration et de plaidoyer associé à ces scénarios, le modèle est essentiellement construit pour explorer l'atteinte d'objectifs ambitieux de soutenabilité par la mise en œuvre de la sobriété, de l'efficacité énergétique et le déploiement des renouvelables, et d'en éclairer les moyens nécessaires, les bénéfices et les impacts.</p>	
Type d'outil	<p>Il s'agit d'un outil technico-explicite de simulation de la trajectoire énergétique et des émissions de gaz à effet de serre associées, basé sur une approche « bottom-up » d'agrégation des gestes de consommation et de production correspondants.</p>	
Champ de modélisation	<p>Le modèle couvre l'ensemble du système énergétique au sens des approvisionnements en énergie et des consommations.</p>	
Usage type / périodicité	<p>L'usage du modèle est presque exclusivement interne: les versions successives accompagnent la production des scénarios publiés par l'Association négaWatt. Dans l'intervalle, le modèle peut être ponctuellement utilisé pour répondre à des questions d'actualité ou mener des analyses de sensibilité.</p>	
Architecture	<p>L'outil est structuré par un tableau central, sous Excel, qui intègre l'ensemble des modules relatifs à l'évolution de la consommation d'énergie, par secteur et de fourniture d'énergie pour assurer l'équilibre au pas annuel, par vecteur énergétique, et le calcul des émissions de gaz à effet de serre. Cet outil central pilote également l'articulation avec d'autres modèles :</p> <ul style="list-style-type: none"> un modèle de calcul d'équilibre offre-demande du réseau électrique au pas de temps horaire (codé en C++), l'outil négaMAT pour la modélisation des flux de matériaux et des besoin de l'industrie le modèle du Scénario Afterres de l'association Solagro pour l'interface biomasse avec la transition du monde agricole et la gestion durable des forêts, des modèles post-traitement relatifs aux impacts économiques (coûts et emplois). <p>Ce modèle central est également couplé avec un outil de tracé de diagrammes de Sankey.</p>	
Rythme d'actualisation	<p>Le modèle peut faire l'objet d'une actualisation en continu mais les versions successives sont surtout issues du renforcement engagé lors de chaque période de production d'un nouveau scénario, où une nouvelle version est stabilisée. Les derniers scénarios ont été publiés tous les cinq ans environ, pour être versés au débat public à l'occasion des grandes campagnes électorales.</p>	
Périmètre technique	Bâtiments	Voir module spécifique.
	Usages	Voir module spécifique.
	Population	Voir module spécifique.
Périmètre géograph.	Échelle	<p>Le modèle procède essentiellement par désagrégation à l'échelle des catégories et des unités qu'il considère, selon les secteurs, de données à l'échelle nationale.</p> <p>D'une manière générale, il n'intègre pas de données territorialisées et ne prend pas en compte les spécificités ou contraintes à une maille infranationale (par exception, la désagrégation des déplacements est différenciée selon un découpage en neuf types de zones, de la plus à la moins urbaine; ceci n'est cependant pas couplé à l'analyse menée sur les bâtiments).</p>
	Territoire	Il couvre l'ensemble de la France métropolitaine.
Périmètre temporel	Horizon	La modélisation porte principalement sur la période jusqu'à 2050, qui est celle couverte par le scénario publié, mais une modélisation plus globale et moins détaillée est menée jusqu'à 2070.
	Pas temporel	Le pas de temps principal du modèle est un pas annuel. L'équilibre annuel en énergie boucle avec une modélisation de l'équilibre offre-demande électrique au pas horaire.
Principes de calcul	<p>Le modèle construit, à partir d'une projection démographique et d'une désagrégation relativement fine, par secteur et par usage, des services énergétiques, une trajectoire globale de consommation d'énergie finale, calculant l'impact sur la consommation d'hypothèses de sobriété et d'efficacité.</p> <p>Il croise cette demande avec une trajectoire de production domestique d'énergie primaire et d'importation, en modélisant l'ensemble des chaînes énergétiques, inclus le mix entre vecteurs énergétiques primaires et secondaires. Le modèle vérifie le bouclage entre fourniture et demande (ajustée par les importations d'énergie fossile) au pas annuel, et propose pour chaque année une optimisation électrique vérifiant l'équilibre offre-demande au pas horaire.</p> <p>Les résultats en énergie permettent de calculer des émissions de gaz à effet de serre.</p>	

<p>Le couplage du modèle SnW avec le modèle négaMAT et le modèle Afterres permettent par ailleurs de traiter certains aspects intersectoriels et d'étendre la modélisation à une empreinte globale en matières premières et en émissions de gaz à effet de serre.</p> <p>Enfin, des modules de calcul permettent d'évaluer ex-post certains aspects de la trajectoire, incluant la pollution atmosphérique d'une part, les coûts relatifs aux transformations et leur contenu en emplois d'autre part.</p>	
Entrées	Les principales entrées sont d'abord les données statistiques ou reconstituées nécessaires pour caractériser la situation actuelle avec le niveau de désagrégation voulu. Le modèle s'appuie ensuite sur les hypothèses formulées sur l'évolution des différents paramètres structurant la consommation et la production. Enfin, il utilise une projection démographique, construite actuellement à partir de la projection nationale centrale fournie par l'INSEE.
Sorties	Les principales sorties du modèle portent sur la consommation d'énergie finale, détaillée par secteur et par usage et déclinée par vecteur énergétique secondaire, et la remontée aux volumes correspondants par vecteur énergétique primaire et par source d'énergie primaire. Il fournit également les émissions de gaz à effet de serre par usage, par secteur et par gaz.
Détail	
Module spécifique	Onglets bâtiment du modèle central
Périmètre technique	Bâtiments Le modèle couvre le secteur résidentiel et le secteur tertiaire. Il décrit l'ensemble du parc résidentiel, comprenant les logements vacants et résidences secondaires. Il est également complet sur le parc tertiaire, segmenté en huit branches. Cette segmentation inclut les entrepôts logistiques et l'artisanat, mais ne traite pas les bâtiments agricoles (qui sont comptés dans un module Agriculture).
Usages	Tous les usages de l'énergie dans les bâtiments sont couverts, pour le résidentiel et pour le tertiaire. Les besoins de chauffage et les autres usages liés à la chaleur ou au froid sont traités dans le modèle de stock du parc de bâtiments. Les autres usages sont traités par un modèle de parc sur les équipements relevant de l'électricité spécifique ; la cuisson fait l'objet d'un onglet spécifique.
Population	La population française est décrite sous forme d'individus, tenant compte notamment de l'évolution de la pyramide des âges (par rapport notamment à des évolutions de besoin du tertiaire), et de ménages, tenant compte notamment de l'évolution du taux de cohabitation par foyer.
Périmètre géograph.	Échelle Le modèle procède par désagrégation à l'échelle du logement ou de surfaces de plancher tertiaire à partir de données au niveau national, sans distinction à une maille territoriale plus fine.
	Territoire Comme le modèle central, ce module couvre la France métropolitaine, c'est-à-dire Corse comprise.
Périmètre temporel	Horizon <i>Voir modèle général.</i>
	Pas temporel <i>Voir modèle général.</i>
Principes de calcul	Le modèle traite dans deux modules différents les besoins du résidentiel et du tertiaire qu'il agrège dans une demande globale du secteur du bâtiment. Les calculs reposent sur un modèle de parc permettant de paramétriser des actions de construction, de démolition et de rénovation, et de représenter une évolution des performances énergétiques de l'enveloppe et des systèmes et des vecteurs énergétiques que ces derniers mobilisent (lui-même lié au mix des sources d'énergie alimentant ces vecteurs). Ceci couvre les usages chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation (inclus l'évolution du taux d'équipement), cette dernière étant moins bien couverte du fait d'un manque de recul. Le modèle de parc est basé pour les logements sur une segmentation entre maisons individuelles et logement collectifs (MI/LC), sur des périodes de construction calées sur l'introduction et les évolutions de la réglementation thermique (avant 1975, 1982, 1989 et 2000) et par l'état de rénovation thermique (équivalente BBC ou non). Pour le tertiaire, le parc complet est segmenté en huit branches, et par état de rénovation (neuf, non rénovable, à rénover, rénové). Les consommations de chauffage sont construites à partir de l'état initial par variation tendancielle pour le parc non rénové, et par atteinte d'une valeur cible pour les rénovations performantes. La consommation d'électricité spécifique (et par extension, de la cuisson) est traitée via un modèle de parc sur l'équipement des logements – respectivement des unités d'activité tertiaire – en appareils assurant une trentaine de services distincts. L'évolution des consommations est calculée en croissant des hypothèses sur le taux d'équipement et la performance des appareils avec des hypothèses sur l'intensité et le rythme d'usage.
Entrées	Les principales entrées nécessaires au modèle sont : <ul style="list-style-type: none">• une projection démographique, par tranche d'âge;• celle-ci permet de caler la demande de nouveaux logements en intégrant une hypothèse d'évolution du taux d'occupation des logements, via le taux de cohabitation;• elle permet également de caler la demande de tertiaire neuf (par exemple les bureaux en fonction de la tranche 25-64 ans, l'enseignement-recherche en fonction de la tranche 0-24 ans, etc.), en intégrant par ailleurs une hypothèse de découplage entre les surfaces et l'activité;• des hypothèses de rénovation, construites selon une courbe en S permettant la rénovation de l'ensemble du parc d'ici 2050 (moyennant 10% environ laissé au niveau, pour raisons patrimoniales notamment);• des hypothèses d'évolution des équipements électroménagers et bureautiques et de leur usage;• des hypothèses d'évolution du mix énergétique et des rendements.
Sorties	La principale sortie du modèle, pour le bâtiment est l'agrégation des consommations énergétiques (en demande finale) par catégories, par secteurs (résidentiel et tertiaire, par segments) et par usages. Le modèle complet permet un rebouclage avec le système énergétique par l'outil d'équilibre offre-demande, qui permet d'établir les consommations en énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre, au sens du scope 1 et 2 des émissions directes de la consommation d'énergie (les émissions du scope 3 sont obtenues via la modélisation matériaux par négaMAT).
Éléments de discussion	
Points forts	La modélisation du secteur bâtiment s'inscrit dans un modèle complet, produisant une prospective détaillée et relativement exhaustive du système énergétique français, y compris la prise en compte de l'industrie de l'énergie, et le calcul des pertes de production, transformation et distribution des différents vecteurs énergétiques.

		L'outil intègre également une modélisation détaillé, incluant celle du parc, sur l'électricité spécifique. Il s'appuie par ailleurs sur des consommations cible calées sur des retours de terrain(campagnes de mesures sur les rénovations BBC, sur l'électricité spécifique, etc.).
Questionnements et développements		<p>Parmi les principaux manques identifiés et non traités à ce jour, on peut signaler :</p> <ul style="list-style-type: none"> l'absence de régionalisation du besoin, qu'il s'agisse de logement neuf ou plus largement pas de prise en compte des disparités régionales. Cette problématique n'est pas couverte par cet outil, mais des déclinaisons régionales du scénario négaWatt ont été produites ainsi qu'une étude sur le recollement national des SRADDET territoriaux¹⁰; l'absence de prise en compte de l'évolution du climat. Le modèle fonctionne avec un seul jeu de données climatiques, et ne tient pas compte de l'évolution future du climat pour projeter les consommations de chauffage ou de climatisation (même s'il intègre une dérive dans les besoins tendanciels, i.e. pour les bâtiments existants avant leur rénovation).
Besoins identifiés	Données	<p>Pour le résidentiel, on manque notamment de données au niveau nécessaire sur les démolitions, les logements vacants et les résidences secondaires. Il y a également un flou sur les unités utilisées dans certaines statistiques (par exemple entre des m² de SHAB, de plancher, ou de SHON).</p> <p>Pour le tertiaire, la principale difficulté concerne le recollement des données entre CEREN, Sit@del et d'autres sources. Les nomenclatures ne sont pas partagées. On dispose au final de très peu de données désagrégées sur le tertiaire. Enfin, on peut signaler la difficulté à trouver des données pour la même année de référence pour les différents secteurs de consommation.</p>
Méthode		<p>D'un point de vue méthodologique, aucun développement n'est en cours, en attendant la mise à jour de l'outil pour un prochain scénario. Outre les enjeux de régionalisation et de prise en compte de l'évolution climatique, un sujet d'intérêt concerne la désagrégation de la trajectoire en moyenne pour la population selon différentes catégories d'âge, de zone d'habitation ou socio-économique, qui serait utile mais représente un important défi méthodologique.</p> <p>Il serait également intéressant d'intégrer une évaluation de l'empreinte au sol: l'approche de modélisation le permet, mais le développement correspondant reste difficile.</p>
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	<p>Dans la nomenclature adoptée ici, le modèle peut être décrit comme un outil énergie de simulation exploratoire à visée normative, fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite l'ensemble du secteur du bâtiment à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France métropolitaine, à un horizon 2050 partiellement prolongé à 2070, au pas annuel pour l'énergie et horaire pour l'électricité.</p>
	Champs et paramètres	<p>Le modèle met en jeu les dimensions suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ressources: la consommation d'énergie associée aux bâtiments, en lien avec des enjeux de production de cette énergie et d'impact de cette consommation (émissions de gaz à effet de serre) est l'enjeu central du modèle; bâtiments: il prend en compte un modèle de stock des bâtiments, tenant compte des surfaces et des caractéristiques thermiques et constructives pour modéliser leur évolution et son impact sur la consommation d'énergie; équipements: il s'appuie également sur un modèle de stock des équipements utilisés dans les bâtiments pour les différents usages pour intégrer des hypothèses sur l'évolution de leur nombre, de leur performance ou de leur usage; population: le modèle porte moins sur cette dimension, essentiellement traitée sous l'angle de données d'entrée démographiques, mais endogénése toutefois des paramètres d'évolution comme le taux de cohabitation des ménages ou des effets différenciés comme pour le vieillissement. <p>Le modèle ne traite en revanche directement ni la dimension des sols, dans la mesure où il n'intègre pas de modélisation liée à la localisation des bâtiments et ne représente que leur surface de plancher (et pas leur empreinte au sol), ni la dimension de l'économie: celle-ci est traitée a posteriori sous l'angle d'une évaluation des coûts ou des emplois associés, qui peut en retour informer une évolution du scénario mais n'entre pas en tant que telle dans sa modélisation.</p> <p>Enfin, un module complémentaire, qui n'a toutefois pas été utilisé pour le scénario 2021 mais qui avait été développé pour l'exercice précédent, permet de calculer selon une logique d'agrégation par branche des coûts d'investissement et d'exploitation associés à la trajectoire, et d'en déduire par l'application de ratios un contenu correspondant en emplois.</p>
	Chaînages et bouclages	<p>Le modèle SnW est pour l'essentiel articulé avec deux modèles : négaMat, également développé par l'Association négaWatt, qui apporte une vision intégrée sur l'empreinte en matériaux et en gaz à effet de serre, et le modèle Afterres, développé par Solagro, qui assure la cohérence entre les enjeux énergie, matériaux, l'agriculture et la forêt.</p> <p>Le modèle n'est en l'état pas interfacé avec d'autres outils. Bien qu'il n'ait pas été construit dans cette optique, son caractère explicite et désagrégé permet d'en extraire des données relativement utilisables par d'autres modèles.</p>
	Questions et enjeux	<p>Par rapport aux principaux questionnements identifiés, l'approche du modèle SnW se prête particulièrement bien à traiter certains enjeux associés à la complétude technique, notamment l'analyse en cycle de vie et les questions d'empreinte carbone (grâce au couplage avec négaMAT). Sa méthodologie est également propre à intégrer certaines thématiques liées aux modes de vie, en particulier sur la sobriété, bien sûr, et l'évolution des usages.</p> <p>Il est à l'inverse peu adapté au traitement des enjeux des dynamiques économiques, même s'il permet de capter des évaluations en termes d'emploi et de précarité énergétique (via l'action de rénovation), qui pourraient être renforcées. Il ne permet pas, malgré son niveau de désagrégation, de capter des enjeux de dynamique territoriale mais peut être utile, croisé avec d'autres outils, pour intégrer des réflexions territoriales dans une cohérence nationale.</p> <p>Enfin, il reste pour l'essentiel construit sur une modélisation incrémentale qui ne permet pas, en l'état, de développer une quantification de la réponse aux crises (même s'il permet d'en interroger certains aspects au niveau qualitatif).</p>

¹⁰<https://www.negawatt.org/Analyse-et-concatenation-du-volet-energie-des-SRADDET>

Modèle SnW



A14. négaMAT (Association négaWatt)

Outil		
Modèle / outil	négaMat	<i>Cet outil propose une modélisation détaillée de l'empreinte matériaux de l'économie française, inclus le secteur de la construction, et de son évolution possible dans des scénarios de transition énergétique.</i>
Porteur(s)	Association négaWatt	
Développeur(s)	Association négaWatt et Institut négaWatt	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Thomas LETZ Coordinateur du modèle - Association négaWatt Emmanuel RAUZIER Pilote modélisation matériaux - Institut négaWatt Adrien JACOB Développeur des modèles - Institut négaWatt Thierry RIESER Directeur - Enertech	thomas.letz@negawatt.org e.rauzier@institut-negawatt.com a.jacob@institut-negawatt.com rieser@enertech.fr
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 21/02/2023 – relue le 10/03/2023. Revue et complétée par les auteurs le 13/10/2023. Fiche validée le 17/10/2024.	
Ressources	Description détaillée du modèle et de son application pour le scénario négaWatt 2022 : https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2022/9-deep-decarbonisation-of-industry/the-material-impacts-of-an-energy-transition-based-on-sufficiency-efficiency-and-renewables/	
Modèle général		
Finalité	Le modèle négaMat est la première version complète de modélisation de l'ensemble de la consommation en matières premières de l'économie française, développée pour compléter la modélisation réalisée par le modèle SnW pour construire les scénarios de l'Association négaWatt sur la transition énergétique en France. Il a depuis fait l'objet d'un développement plus complet sous la forme de l'outil MODEIRE.	
Type d'outil	Il s'agit d'un modèle de simulation exploratoire, techno-explicite et désagrégé de l'évolution de la consommation et de la production du point de vue des matériaux.	
Champ de modélisation	Il permet d'articuler les évolutions des biens de consommation et les besoins en matériaux énergivores et critiques, sur l'ensemble de l'économie, au périmètre du territoire et en empreinte, tenant compte des importations et des exportations. Sa décomposition sectorielle couvre notamment le secteur de la construction.	
Usage type / périodicité	Cet outil a été développé en interne par l'Association négaWatt, sur la base d'un travail initié en coopération avec l'ADEME. Il a principalement été développé pour les besoins de la production de scénarios de l'Association négaWatt, et a pu être utilisé dans le cadre du scénario négaWatt 2021, mais il a également servi, sous une forme adaptée, dans la production de scénarios de l'ADEME. Il n'a toutefois plus vocation à évoluer en tant que tel dans la mesure où il a été remplacé par MODEIRE.	
Architecture	Il s'agit d'un modèle bottom-up de quantification des besoins en matériaux de tous les secteurs de l'économie, représentée par un découpage en secteurs principaux avec une subdivision plus fine pour les secteurs concernés par la transition énergétique. Pour l'essentiel, cet outil permet de décrire, en caractérisant leur état initial et en projetant des hypothèses sur leur évolution, les chaînes reliant la consommation de biens finaux aux besoins primaires de matériaux bruts. Il s'appuie pour cela sur des matrices de passage entre les matériaux bruts, les matériaux transformés, les produits intermédiaires et les biens et équipements finaux, calculés par branche sur la base d'une décomposition de l'économie en 9 secteurs, eux-mêmes subdivisés en 128 sous-secteurs, prenant en compte les échanges entre toutes ces branches. L'ensemble permet d'établir les flux «du berceau à la tombe» correspondant à la demande finale de l'économie française pour chaque année considérée, en quantifiant les besoins de production industriels, les imports-exports, et les impacts en empreinte matériau. Le modèle repose sur trois éléments : une image complète de la matrice détaillée des flux pour une année de référence, une matrice d'hypothèses sur l'évolution de la demande, des échanges, et des différents paramètres associés aux processus de transformation, et un module de calcul fournissant les résultats finaux. Cette architecture permet de prendre en compte dans le calcul des hypothèses relatives à la sobriété, à l'économie circulaire, aux taux de recyclage, à l'efficacité et à l'évolution technique des procédés, ainsi qu'à celle des importations et des exportations. La séparation entre le bloc de construction des hypothèses prospectives et le module de calcul permet d'utiliser négaMat pour projeter les résultats de différents scénarios.	
Rythme d'actualisation	Le modèle ne fait plus l'objet d'une actualisation sous sa forme initiale.	
Périmètre technique	Bâtiments Usages Population	<i>Voir module spécifique.</i>
Périmètre géograph.	Échelle Territoire	Le modèle opère à l'échelle du territoire national, tout en prenant en compte les flux associés aux importations et aux exportations. Il est appliqué à l'économie française, mais peut s'appliquer par conception à d'autres pays, ou à des régions comme l'Europe, dès lors que les données statistiques nécessaires à son calibrage au périmètre géographique choisi sont disponibles. Dans son calibrage initial, le modèle couvre la France métropolitaine, Corse comprise.
Périmètre temporel	Horizon Pas temporel	Le modèle repose sur un processus de calcul incrémental, permettant de projeter une évolution sur une période choisie. Il a été utilisé pour la construction de scénarios à l'horizon 2050. Le calcul est opéré au pas annuel.
Principes de calcul	Le modèle repose sur l'utilisation de matrices calibrées pour calculer des flux de matériaux entre différentes étapes du processus de transformation et entre différentes branches de l'économie,	

permettant de remonter de la consommation finale de biens et d'équipements aux besoins primaires en matériaux bruts, en tenant compte à chaque étape des importations et des exportations.

Une spécificité importante de l'outil est qu'il procède d'un calcul en flux physiques, plutôt qu'en valeur monétaire, ce qui implique d'être en mesure, pour établir la matrice des flux pour l'année de référence, de quantifier en tonnes par an la production, les importations, les exportations et la consommation aux différentes étapes intermédiaires et finales de matériaux, pour l'année considérée.

La modélisation opérée par négaMat recouvre essentiellement six étapes :

- **étape 1**: la consommation finale est décrite sous forme de volumes de biens et d'équipements, répartis en 9 catégories et 128 sous-catégories. Leur évolution peut être, en fonction du type de biens et d'équipements, modulée en fonction d'hypothèses de sobriété sur leur dimensionnement ou sur leur usage, sur leur réutilisation, et sur leur durée de vie, inclus la possibilité de les réparer en recourant à des pièces de rechange ;
- **étape 2** : la remontée de la consommation domestique à la production domestique de ces biens et équipements finaux s'opère en tenant compte des importations, des exportations et de l'évolution des stocks de ces biens. Elle fournit un ratio P/C qui peut être modulé dans les scénarios par l'introduction d'hypothèses sur ces facteurs, désagrégée à l'échelle de 58 secteurs de bien finaux, et 137 secteurs de production de matériaux de base, intermédiaires ou recyclés ;
- **étape 3** : les chaînes de matériaux mis en jeu aux différentes étapes sont alors reconstituées, autour de 5 classes de matériaux de base : (1) matières premières issues de la biomasse (bois et produits végétaux), (2) métaux, (3) silice et lithium, (4) produits minéraux (terre, sable, granulats, clinker, plâtre, chaux), et (5) bases chimiques (ammoniac, chlore, soude, oléfines, aromatiques et autres). Lorsque c'est possible, et en particulier pour les matériaux mis en jeu dans les secteurs les plus intensifs en énergie, l'évolution possible en termes de poids ou de composition des matériaux mis en jeu dans les biens et équipements finaux peut être prise en compte ;
- **étape 4** : la production de déchets et le recyclage des matières premières est prise en compte pour l'ensemble des biens et équipements finaux. Pour chacun, une durée de vie moyenne permet d'associer un flux de déchets bruts à la consommation antérieure, puis ce flux est subdivisé entre utilisation dans l'agriculture, incinération, collecte en vue d'un recyclage et perte en décharge ou remblais. Un taux effectif de recyclage est ensuite appliqué, en fonction des secteurs et des produits, au flux collecté. Comme pour les étapes précédentes, des hypothèses d'importation et d'exportation peuvent être appliquées à ces flux ;
- **étape 5** : les besoins en matières premières sont alors reconstituées sur la base des besoins en matériaux primaires, selon une classification en 4 grandes catégories (biomasse, métaux, minéraux non métalliques, énergies fossiles), elles-mêmes divisées en sous-catégories. Ce calcul est établi en termes de consommation domestique et d'empreinte, tenant compte d'hypothèses sur les importations et les exportations et du taux d'incorporation de matériaux recyclés ;
- **étape 6** : pour finir, le caractère soutenable ou non du besoin en matières premières est interrogé, pour chaque sous-catégorie concernée, en le comparant à un indice de disponibilité. Celui-ci peut-être ajusté en fonction des critères que l'on se fixe. Dans le paramétrage utilisé pour le scénario négaWatt 2022, il est par exemple établi pour les matières minérales en appliquant au volume de réserves prouvées un taux correspondant à la part de la population française dans la population mondiale.

Entrées	Les entrées du modèle sont de deux ordres : celles-ci comprennent d'une part l'ensemble des données nécessaires à la caractérisation des flux au périmètre territorial choisi pour l'année de référence, directement tirées ou inférées des données statistiques disponibles, d'autre part l'ensemble des données du bloc d'hypothèses prospectives, qui portent sur l'évolution de la demande finale en lien avec les hypothèses de sobriété, sur les hypothèses relatives à l'efficacité des procédés de transformation et sur la substitution entre matériaux, sur les taux de collecte et de recyclage et sur les importations et exportations.
Sorties	Le module de calcul de négaMat fournit sur cette base une projection détaillée des flux de matériaux entrant et sortant du territoire et entrant et sortant de chaque étape de transformation dans chaque branche, pour projeter au final une évolution de l'empreinte matières de l'économie.

Détail		
Module spécifique	Module BTP	
Périmètre technique	Bâtiments	Le module BTP correspond, dans les matrices de caractérisation de l'année de référence et de construction des hypothèses prospectives de négaMat, au bloc relatif à l'activité de construction. Il comprend dès lors le parc résidentiel complet, y compris les résidences secondaires et les logements vacants, et le parc tertiaire complet, inclus l'ensemble des commerces de grande distribution, hôtels, enseignement, bureaux (CHEB) et des locaux de commerces hors grandes surfaces, artisanat, services public de santé, culture et loisir (CASCL) ainsi que les routes, réseaux ferrés, ouvrages d'art et énergie, voirie et réseaux divers (VRD) et divers travaux publics.
Usages	L'outil négaMat couvre, via des matrices appliquées à l'ensemble de l'économie française, l'ensemble des besoins en matériaux associés au cycle de vie des bâtiments (construction, entretien et rénovation, réhabilitation ou démolition) ; les usages par leurs occupants sont également pris en compte, à travers la demande finale en biens et en équipements, mais sont couverts par d'autres parties du modèle que le module BTP. Le modèle était initialement centré sur les 9 matériaux des industries dites grandes consommatrices d'énergie, regroupées sous la catégorie des IGCE – c'est-à-dire l'acier, l'aluminium, le clinker, le verre, les papiers cartons, l'éthylène, l'ammoniac, le dichlore et le sucre. Il a ensuite été élargi à de nombreux autres, notamment plâtre, chaux, céramiques, métaux non ferreux, batteries et électronique. Une centaine de matériaux sont couverts actuellement. La valorisation des déchets du BTP est également modélisée.	
Population	La population n'est pas décrite dans le modèle, qui ne modélise que les flux physiques de matières. Elle est cependant implicitement prise en compte puisque le modèle repose sur une caractérisation de la demande finale en biens et en équipements, et sur une projection de l'évolution de cette demande qui sont nécessairement associées à la population et son évolution.	
Périmètre géograph.	Échelle	Voir modèle général.
	Territoire	Voir modèle général.
Périmètre temporel	Horizon	Voir modèle général.
	Pas temporel	Voir modèle général.

Principes de calcul	<p>La modélisation des besoins en matériaux associés à la construction repose sur une segmentation en grandes catégories: les maisons individuelles(MI), les logements collectifs(LC), le tertiaire, les bâtiments industriels, agricoles et artisanaux, et les travaux publics. Pour chacun, des mètres et des quantitatifs sont associés à des volumes de construction neuve, et pour les bâtiments, de rénovation, avec deux options – rénovation au niveau BBC ou non.</p> <p>Ces quantitatifs sont ajustés pour recoller avec les flux totaux du secteur BTP à l'année de référence. Le modèle reconstruit en bottom-up les besoins de matériaux à partir des rythmes de construction et de rénovation. Alors que les biens et équipements font en général dans les autres secteurs l'objet d'hypothèses sur leur durée de vie, ce n'est pas le cas dans le module BTP, puisqu'il paraît difficile de projeter une durée de vie moyenne des bâtiments. Par défaut, le calcul du module BTP projette une évolution du taux annuel de destruction de bâtiments et d'ouvrages.</p>	
Entrées	<p>Comme l'outil négaMat en général, le module BTP requiert des hypothèses de caractérisation de la situation de référence, qui sont extraites ou déduites de données statistiques et recollées avec les flux totaux du secteur ; il se nourrit ensuite d'hypothèse sur les évolutions possibles.</p> <p>Pour l'application au scénario négaWatt 2022, les hypothèses de construction et de rénovation ont été fournies par le modèle central (Modèle SnW).</p> <p>Les hypothèses de construction neuve et de rénovation sont prise en compte chaque année, ainsi que des évolutions de modes constructifs, niveaux d'isolation, substitutions de matériaux. Il en va de même pour les travaux publics, avec notamment les rythmes de construction d'infrastructures de transport. Les hypothèses couvrent également l'évolution des importations et exportations de matériaux, ainsi que des hypothèses sur le taux de recyclage par ressource.</p>	
Sorties	<p>Le calcul fournit une projection de l'évolution des besoins en matériaux, détaillés par catégorie, pour les opérations de construction dans le bâtiment, les ouvrages d'art, les voiries (et VRD) et le Ferroviaire. Il projette les besoins en matériaux, extraits sur le territoire ou importés (et les exportations correspondantes). Il projette également la valorisation des déchets, avec les flux de matières valorisées et le détail disponible du devenir des déchets entre réemploi sur site, valorisation en remblai, recyclage, décharges de divers types et incinération.</p>	
Éléments de discussion		
Points forts	<p>Le modèle négaMat est construit pour représenter l'ensemble des flux matières associés à l'activité économique (production, consommation et échanges), dont il offre par son approche désagrégée et intégrée une description systémique, permettant une analyse à ce niveau des transformations possibles.</p> <p>Il présente également l'avantage de proposer une quantification directe en volumes de matières, indépendamment de leur valeur monétaire. Il repose de plus sur un calibrage détaillé, « bottom-up » recalé pour la caractérisation des flux initiaux à l'année de référence sur les statistiques « top down ». Enfin, pour son application au secteur du bâtiment, il permet de la positionner, en termes d'empreinte matières, dans un périmètre plus complet d'empreinte de la construction, sur tout le secteur du BTP.</p>	
Questionnements et développements	<p>Une seule géométrie de bâtiment a été prise en compte par catégorie pour appliquer les hypothèses quantitatives sur l'évolution des opérations. Cela introduit une incertitude liée au caractère plus ou moins représentatif de cette morphologie type, notamment pour le secteur tertiaire.</p> <p>La caractérisation de l'état de référence repose sur un croisement entre les données détaillées disponibles et les données agrégées par secteur. Toutefois, les données détaillées restent incomplètes par rapport au périmètre de modélisation. Ainsi il reste dans le rebouclage de l'année de référence, une part importante d'usages non identifiés pour certains matériaux.</p> <p>Compte tenu de la nécessité de disposer, même si elles restent incomplètes, de données suffisamment détaillées et consolidées, le modèle négaMat a été construit avec l'année 2015 comme année de référence. En lien avec le développement d'une nouvelle version de MODEIRE, l'année de référence doit être actualisée à 2019. Un travail de coordination avec les données des plans sectoriels et les scénarios Transitions 2050 de l'ADEME est également intégré.</p> <p>De plus, toujours en lien avec le développement de MODEIRE, une approche de l'empreinte carbone doit être développée.</p>	
Besoins identifiés	<p>Données</p> <p>Le développement de cet outil se heurte, notamment pour la partie construction, au manque de données sectorielles détaillées, qui permettraient de réduire la part d'usages non identifiés.</p> <p>Il est par ailleurs nécessaire d'informer le mieux possible, pour étayer les choix de scénarios, les hypothèses prospectives. Dans ce domaine, pour le module BTP, il est très intéressant de pouvoir développer des études sectorielles, comme celles que développe l'ADEME, pour affiner certaines hypothèses prospectives (par exemple sur l'évolution du taux de clinker du ciment, etc.).</p>	
Méthode		
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	Le modèle négaMAT est un outil de simulation exploratoire, techno-explicite et désagrégié de l'évolution de l'empreinte matière de l'ensemble de l'économie française, des résultats au pas annuel jusqu'à un horizon 2050.
	Champs et paramètres	Traitant de l'ensemble de l'économie nationale plutôt que spécifiquement du bâtiment, il aborde essentiellement ce secteur sous trois angles: tout d'abord, en lien avec son objet premier, il se concentre sur la dimension des ressources, s'appuyant sur une unité fonctionnelle liée aux tonnages de matériaux; il intègre ensuite celle des équipements, à travers l'ensemble de la production et des échanges; enfin, il intègre fortement la dimension bâtiments, via des unités de construction, entretien, rénovation ou démolition appliquées à des mètres de différentes catégories de bâtiments.
	Chaînages et bouclages	Cet outil constitue, avec le modèle SnW qui est centré sur la consommation et la production d'énergie et le modèle Afterres, développé par Solagro sur l'agriculture et la forêt, une suite complète pour l'élaboration de scénarios énergie-matières à l'échelle nationale. Il n'est en l'état pas interfacé avec d'autres outils, mais est très proche, de par leur origine commune, d'un outil comme MODEIRE qui s'intègre dans la suite d'outils utilisés par l'ADEME. Plus généralement, son caractère explicite et désagrégié permet d'en extraire des données relativement utilisables par d'autres modèles.
	Questions et enjeux	Comme son prolongement pour l'ADEME, MODEIRE, cet outil répond à l'origine à une volonté d'éclairer une question alors nouvelle sur l'empreinte matériaux des trajectoires de transition énergétique. Il fournit à ce titre, via sa démarche de caractérisation physique des échanges et des modes de production, un support utile pour éclairer la question de l'empreinte en émissions de gaz à

effet de serre de l'évolution de l'économie française. Au-delà de cet enjeu, il présente notamment l'intérêt, vis-à-vis de la **complétude technique**, de traiter au sein du même module les besoins associés au bâtiment et ceux associés aux infrastructures. Ensuite, bien qu'il ne porte pas sur la modélisation des modes de vie, il peut éclairer des enjeux de **dynamiques sociétales** liés à la sobriété, à l'économie circulaire ou à l'évolution des usages. Enfin, même s'il est fondé sur un mode de simulation continuiste, qui ne vise pas à représenter une situation de **réponse aux crises**, il fournit à minima une approche pour s'interroger sur la robustesse vis-à-vis du risque de tension ou de rupture d'approvisionnement sur des ressources.

A15. Modèle artificialisation (CGDD)

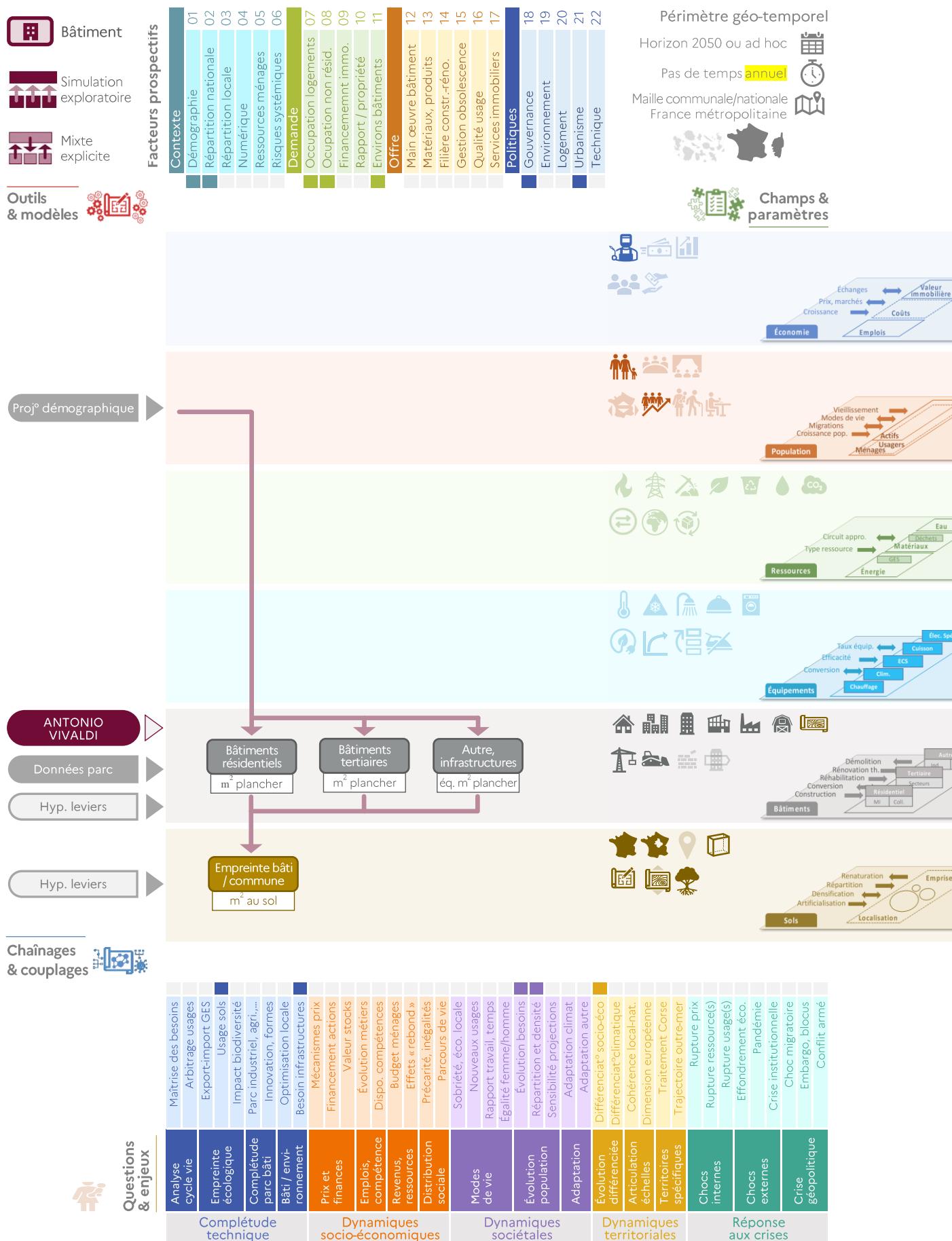
Outil		
Modèle / outil	Modèle artificialisation (pas de nom)	Cet outil permet une simulation de l'évolution des surfaces artificialisées, partant d'un état des lieux de l'occupation des sols à l'échelle communale et jouant à l'échelle nationale sur quatre leviers liés à l'artificialisation par le parc bâti.
Porteur(s)	CGDD	
Développeur(s)	CGDD	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Kiarash MOTAMEDI Adjoint au chef du bureau des transports, de l'aménagement et des risques - CGDD/SEVS/SDEE3	kiarash.motamedi@developpement-durable.gouv.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 06/03/2023. Compléments apportés par les auteurs le 31/10/2023.	
Ressources	https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Théma - Trajectoires vers l'objectif zéro artificialisation nette.pdf	
Modèle général		
Finalité	Le modèle est destiné à être le support d'exercices de projection de consommation d'espace agricole, forestier, naturel en fonction de l'évolution démographique nationale, à l'appui des enjeux de maîtrise de l'artificialisation des sols.	
Type d'outil	Il s'agit d'un outil de simulation incrémentale, plutôt conçu pour mener une analyse prédictive mais utilisable pour une exploration prospective.	
Champ de modélisation	Le modèle est centré sur le bâtiment et dédié à l'empreinte au sol du parc bâti, tous types de bâtiments confondus.	
Usage type / périodicité	L'objectif initial de l'outil est d'appuyer la démonstration de la faisabilité de l'objectif « zéro artificialisation nette » (ZAN) au niveau national, en lien avec son introduction dans la loi. Le modèle a été utilisé dans le cadre de l'étude <i>Transition(s) 2050</i> de l'ADEME, avec une prévision de construction indexée à l'évolution démographique et un effort différent sur les leviers d'action, en lien avec les orientations des quatre scénarios développés dans cet exercice.	
Architecture	Le modèle est basé sur une désagrégation à l'échelle communale du stock de bâtiments, tenant compte à cette échelle de leur répartition par destination, de leur surface de plancher et de leur projection au sol par rapport à cette surface. Il applique ensuite à ce stock, de façon homogène et par itération incrémentale, des évolutions de ces paramètres indexées sur différents leviers favorables ou défavorables à l'artificialisation.	
Rythme d'actualisation	La modélisation a été lancée en 2018-2019. Elle fait l'objet d'un approfondissement continu mais assez lentement, à travers la collaboration avec d'autres acteurs comme l'ADEME, l'IGEDD et à l'occasion de travaux sur des SCOT, ou les ministères, la DHUP par exemple.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre tous les bâtiments, avec toutefois une précision plus grande sur les logements.
	Usages	Les usages énergétiques sont hors champ, mais l'ensemble des usages générant une occupation de bâtiments est par principe couvert par le modèle.
	Population	L'outil prend en compte l'ensemble de la population de la France métropolitaine. Celle-ci ne fait pas l'objet d'une description spécifique mais elle est envisagée dans ses grands déterminants (croissance, taux de cohabitation dans les logements, etc.) pour déterminer l'évolution des besoins de surfaces de plancher.
Périmètre géograph.	Échelle	Le modèle travaille pour la désagrégation du parc et de son empreinte à l'échelle des communes et parcelles, mais applique les leviers d'action sur le niveau d'artificialisation à l'échelle nationale.
	Territoire	Il couvre ainsi la France métropolitaine, à partir d'un découpage à l'échelle communale.
Périmètre temporel	Horizon	Le modèle a été appliqué à 2050 dans le cadre des scénarios de l'ADEME ou d'autres exercices mais il n'est pas limité dans son horizon.
	Pas temporel	Il procède par évolution incrémentale au pas annuel
Principes de calcul	Le modèle repose sur une description à l'échelle communale des superficies, tenant compte de la projection au sol des bâtiments par rapport à leur surface de plancher. Il modélise une trajectoire d'artificialisation en intégrant différentes évolutions basées sur des valeurs moyennes au niveau national. Le modèle projette tout d'abord un besoin brut de construction associé à l'évolution démographique. Quatre leviers sont ensuite combinés pour influer sur l'évolution du niveau d'artificialisation : <ul style="list-style-type: none">• le degré de vacance des bâtiments existants,• la densité de construction,• la reconstruction de nouveaux bâtiments sur l'existant (la ville sur la ville),• la renaturation d'espaces déjà artificialisés.	
Entrées	Les principales entrées nécessaires sont, en lien avec ce principe de calcul : <ul style="list-style-type: none">• les données descriptives de l'état du stock de bâtiments, en termes de surface de plancher et de surface au sol par rapport à la surface totale des unités territoriales concernées ;• les hypothèses démographiques nécessaires à la construction de la trajectoire d'évolution des besoins en surfaces de plancher et au sol, hors mobilisation des leviers d'action ;• les hypothèses d'action sur les quatre leviers propres à chaque scénario soumis à simulation.	
Sorties	Le modèle décrit une évolution à l'échelle communale du parc bâti, de son empreinte au sol et donc des surfaces artificialisées. Il fournit ainsi une projection de la superficie artificialisée à l'échelle nationale.	
Éléments de discussion		
Points forts	Le modèle, par construction, permet de tester des évolutions raisonnables et de montrer qu'en activant à des niveaux réalistes les quatre leviers, on peut atteindre l'objectif zéro artificialisation nette.	

Questionnements et développements	<p>Le modèle a été développé dans le cadre de réflexions relatives à la transition en général, pour l'essentiel déconnectées des réflexions spécifiques au champ de la transition énergétique. Par exemple, il reste très sommaire en termes de représentation des comportements.</p> <p>Le modèle part d'un état actuel de construction à l'échelle nationale, et applique des leviers en valeur moyenne au niveau national, par exemple sur l'hypothèse d'évolution de la densité des constructions. Un travail a été commencé sur la tendance démographique et l'évolution des constructions au niveau des communes, mais les leviers restent appliqués au niveau national.</p> <p>Les données nécessaires pour sortir de cette application à l'échelle nationale n'existent pas à l'échelle communale (ou pas suffisamment), et le modèle dans sa structure actuelle ne permet pas une analyse au niveau communal. C'est un verrou méthodologique important à faire sauter.</p> <p>En projetant pour chaque commune une évolution tenant compte de la projection démographique nationale mais conforme à son chemin actuel, le modèle ne permet pas de prendre en compte une évolution différenciée des politiques.</p> <p>Au-delà du travail de démonstration vis-à-vis de l'objectif ZAN, aller plus loin impliquerait d'aborder des questions autour des usages et besoins qui évoluent. On pourrait par exemple envisager une distinction entre des espaces artificialisés adaptés aux besoins et d'autres non utilisés que l'on peut renaturer, ou encore envisager la réutilisation des friches actuelles et s'interroger sur l'horizon d'épuisement de ce stock.</p> <p>Plus largement, la question de la définition même de l'artificialisation, des normes et des équivalences se pose (quid par exemple de zones agricoles polluées, donc moins favorables à la biodiversité ?). La question qui se pose à terme est celle d'une modélisation de l'impact de l'évolution du parc bâti sur la fonction écosystémique des sols.</p> <p>Il n'y a par ailleurs pas de coûts dans le modèle, qu'il s'agisse de coût des actions, de valeur d'usage ou d'externalités.</p> <p>L'utilisation du modèle pour les scénarios de l'ADEME a reposé sur une application différente dans chaque scénario des leviers de vacance, densification et reconstruction, avec des niveaux adossés aux orientations de ces scénarios en termes d'aménagement du territoire, d'occupation des bâtiments et autre ; l'action de renaturation a été mobilisée en valeur résiduelle. Cet exercice pose au fond une question méthodologique : le modèle doit-il plutôt rester sur de la prolongation de tendance ou aller vers des hypothèses en rupture et une fonction prospective ? Aller vers du prospectif est plus complexe et implique davantage que simplement modifier des paramètres, mais c'est l'occasion de challenger des choix et de mieux décortiquer les phénomènes et les interactions tels que les représente le modèle.</p>
Besoins identifiés	<p>Données</p> <p>L'outil de modélisation de l'artificialisation est fin sur la prévision de besoin brut de construction de logements, en lien avec l'utilisation à la maille de description du parc d'hypothèses démographiques. Cette projection est élargie à d'autres activités de façon moins fine. Le modèle prend en compte les activités à travers l'emploi mais il le fait d'une façon qui n'est pas totalement satisfaisante.</p> <p>Le modèle intègre par ailleurs les ouvrages divers, infrastructures de transports, etc. mais avec beaucoup moins de finesse que sur le parc bâti lui-même.</p>
Méthode	<p>Le modèle repose sur le principe que le rapport entre l'évolution de la population et la surface de terres artificialisées reste, hors mobilisation des leviers d'action, stable dans le temps. C'est une hypothèse qui, sans paraître irréaliste, présente des manques puisque ces deux paramètres obéissent à des lois différentes. Elle est suffisante à ce stade d'utilisation du modèle pour la démonstration mais elle aurait besoin d'être affinée.</p> <p>Enfin, on manque de vision sur la renaturation : typiquement, sur la base du retour d'expérience d'environ 500 ha de compensation en France en 2015-2016, il est considéré qu'on peut pousser jusqu'à 3 000 ha par an. Le travail pour l'ADEME a permis de voir quel niveau de renaturation est nécessaire dans chaque scénario pour atteindre l'objectif ZAN, et de vérifier qu'il reste dans cette limite, mais une meilleure vision des potentiels et de leurs conditions de mise en œuvre reste nécessaire.</p>

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil bâtiment de simulation incrémentale, à visée prédictive ou exploratoire, de l'évolution de l'artificialisation liée au parc de bâtiments et d'infrastructures. Il est construit selon une approche explicite mixte – bottom-up pour la description du parc et top-down pour l'application des leviers sur l'artificialisation –, traitant l'ensemble de la France métropolitaine au pas annuel et à l'horizon que l'on souhaite.
	Champs et paramètres	Le modèle d'artificialisation traite par nature spécifiquement de la dimension sols . C'est dans ce champ qu'il inscrit l'essentiel de sa modélisation, autour d'une unité fonctionnelle constituée de la surface de planchers et au sol de bâtiments à l'échelle communale, en lien donc avec la dimension bâtiments . La modélisation ne mobilise pas d'unités fonctionnelles dans d'autres dimensions mais intègre des évolutions s'y inscrivant : il s'agit en particulier des projections démographiques, qui portent à la fois sur la population et sur les emplois, avec les besoins en logements et en surfaces d'activité qui en découlent.
	Chaînages et bouclages	Le modèle ne fait en l'état l'objet d'aucun chaînage ou bouclage direct avec d'autres outils, mais son utilisation dans le cadre de <i>Transition(s) 2050</i> a montré qu'il pouvait utiliser des orientations fournies par les modélisations du besoin en bâtiments basées sur les outils ANTONIO et VIVALDI . De par son caractère explicite, très désagrégé et incrémental, le modèle semble se prêter à une intégration plus poussée avec divers outils représentant, pour l'évaluation des besoins correspondants en énergie, en matériaux ou pour lui-même, l'évolution du parc bâti.
	Questions et enjeux	Du point de vue des questionnements, il faut noter que le modèle d'artificialisation se situe, malgré son objet apparemment très spécifique, à l'interface de plusieurs facteurs prospectifs importants tels que l'évolution démographique, les enjeux d'occupation des bâtiments et l'urbanisme. En termes de nouveaux questionnements, il porte bien sûr d'abord directement sur l'enjeu technique de l'usage des sols. Dans une moindre mesure, il peut dans le même registre informer la question du besoin d'infrastructures. Il peut également capter des enjeux relatifs aux dynamiques sociétales , notamment sur l'évolution des besoins et plus directement de répartition de la population et de densité, et dans une moindre mesure de dynamiques territoriales , en lien avec les développements possibles du modèle sur une différenciation des projections.

Modèle artificialisation (CGDD)



A16. TiTAN (CGDD)

Outil		
Modèle / outil	TiTAN	Ce modèle propose une optimisation technico-économique des trajectoires de décarbonation, fournissant une évaluation complète des coûts d'abattement du carbone associés, inclus dans le secteur du bâtiment.
Porteur(s)	CGDD	
Développeur(s)	CGDD (développement initial sur 2020-2022 par Artelys)	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Jules BOURGUEIL Responsable SI modélisation technico-économique, CGDD/SEVS/SDEE/BTES Olivier DE GUIBERT Chargé de mission en économie du climat, CGDD/SEVS/SDEE/BTES	jules.bourgueil@developpement-durable.gouv.fr olivier.de-guibert@developpement-durable.gouv.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 28/03/2023. Compléments apportés par les auteurs le 01/11/2023. Fiche validée le 05/08/2024.	
Ressources	https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/TiTAN_03_02_2022.pdf	
Modèle général		
Finalité	<p>Le modèle TiTAN (trajectoires optimisées des technologies d'abattement pour la neutralité carbone) est un modèle technico-économique dédié à l'analyse socio-économique de la transition bas-carbone, et développé ces dernières années pour éclairer les choix stratégiques relatifs à la programmation des actions gouvernementales, notamment dans le cadre de l'élaboration de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC).</p> <p>Il a pour objet de proposer un modèle systémique intégrant l'ensemble des options disponibles pour décarboner l'économie et leur articulation et permettant d'en évaluer le coût, afin d'éclairer les choix d'investissement et de rendre compte des enjeux économiques correspondants.</p>	
Type d'outil	C'est un modèle technico-économique multisectoriel. Il calcule, pour l'ensemble de l'économie qu'il décrit explicitement et de façon désagrégée, une fonction Objectif de minimisation des coûts pour répondre à une demande donnée dans une contrainte carbone donnée.	
Champ de modélisation	Le modèle couvre l'ensemble de l'économie, et se centre sur les options de décarbonation applicables et sur la relation entre les coûts et les résultats de cette décarbonation.	
Usage type / périodicité	—	
Architecture	<p>L'outil est principalement composé des modules suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> des tableurs de paramétrage, qui rassemblent pour chaque secteur (transport, logement, industrie...) les demandes en services à satisfaire d'une part, et les technologies disponibles pour y répondre d'autre part, avec des caractéristiques sur leurs coûts, les besoins d'infrastructures sous-jacentes, leur efficacité, ou encore les émissions de gaz à effet de serre associées; le solveur, qui détermine une trajectoire dite optimum pour satisfaire la demande en minimisant les coûts et en respectant une contrainte carbone si on lui en fixe une. L'optimisation ne porte que sur les secteurs bâtiment, transport, industrie, énergie, les autres (agriculture, forêt, usage des sols) étant paramétrés par l'utilisateur; le comparateur, qui permet de confronter deux scénarios, et d'évaluer l'écart de coût entre les deux. Appliquée par exemple à un scénario optimisé sous contrainte carbone et un scénario optimisé sans contrainte carbone, il fournit ainsi une estimation du coût macro-économique de la décarbonation correspondante. 	
Rythme d'actualisation	<p>TiTAN a été développé progressivement au Commissariat général au développement durable (CGDD). Un premier modèle dit D-CAM avait été réalisé en 2015. Depuis les travaux se sont poursuivis pour objectiver et clarifier la structure des coûts en distinguant rigoureusement les dépenses d'investissements (Capex) des flux associés à l'utilisation des équipements (Opex). Les synergies ou relations de compétition entre les options technologiques ont également été explicitées. La notion de coûts d'abattement a été clarifiée.</p> <p>Le projet actuel, qui couvre l'ensemble des secteurs, est le fruit d'une initiative conjointe du CGDD, de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) et de France Stratégie. Afin de mettre également l'outil « à disposition de tous les acteurs privés de la transition climatique (entreprises, think tanks, ONG) », l'objectif est de rendre l'outil disponible en libre accès (open source) à horizon 2025.</p>	
Périmètre technique	Bâtiments	Voir module spécifique.
	Usages	Voir module spécifique.
	Population	Le modèle prend en compte l'ensemble de la population française et de son évolution, à travers des projections démographiques, mais ne fait pas appel dans sa modélisation à une représentation plus fine de la population, en termes de ménages ou autres.
Périmètre géograph.	Échelle	L'outil considère l'ensemble du territoire national comme une région, sans distinction de spécificités à l'intérieur de cette enveloppe.
	Territoire	TiTAN couvre la France entière, pris comme un tout sans distinction entre territoire continental, Corse et territoires d'outre-mer. Le travail se limite néanmoins (dorénavant) à la métropole.
Périmètre temporel	Horizon	Le modèle peut proposer une optimisation sur soixante ans à partir de son année de référence (2019), soit sur une période allant jusqu'à 2079.
	Pas temporel	L'optimisation est réalisée au pas de 5 ans, à partir d'une étape 0 calée en 2019. Pour l'électricité, le pas de temps est de 1 à 6 tranches horaires par jour.
Principes de calcul	<p>L'outil, par sa vocation intersectorielle, est construit pour mettre en lumière les relations entre plusieurs secteurs, respectivement : Énergie, Bâtiment, Industrie, Transports et Terres (ce secteur n'obéissant toutefois pas au calcul d'optimisation, et faisant l'objet d'un traitement séparé). Il intègre ainsi :</p> <ul style="list-style-type: none"> un volet relatif aux ressources énergétiques primaires mobilisées (en distinguant les ressources importées et les ressources domestiques); 	

- un volet énergie relatif d'une part aux processus de transformation de ces ressources pour la production d'énergie, d'autre part aux différents vecteurs énergétiques ainsi disponibles pour la consommation d'énergie finale ;
- un volet portant sur les processus de production et la gestion des sols (en lien avec les enjeux relatifs à la biomasse), décrivant les activités mises en jeu dans les différents secteurs – bâtiments, transports, industrie et terres – et sous-secteurs ;
- un volet décrivant, en interaction avec cette offre, la demande de biens et services adressée à chaque secteur et partie d'un secteur.

Le modèle intègre des calculs d'émissions de gaz à effet de serre (GES) relatifs aux processus mis en jeu, et de stockage et déstockage de carbone.

L'outil prend en compte, par paramétrage, des contraintes physiques associées aux différentes options, telles que la disponibilité des ressources, ou les limites temporelles ou géographiques dans la dynamique de développement des filières.

Il prend également en compte des contraintes de scénario, notamment la limitation imposée d'un budget carbone.

Sur cette base, le solveur du modèle **TITAN** calcule, pour un jeu d'hypothèses qu'on lui fournit, une optimisation linéaire sous contrainte basée sur une fonction objectif correspondant au coût total actualisé des actions, dans le respect du budget carbone qui lui est fixé (ou non). Le taux d'actualisation utilisé par défaut est de 3,2%, valeur actuelle du taux d'actualisation public de référence, mais ce paramètre peut être modifié dans le modèle. Il est le même pour toutes les technologies, mais le modèle permet de paramétriser un amortissement plus rapide de l'investissement sur les éléments jugés plus à risque.

Le comparateur permet de décomposer le résultat atteint par le scénario de décarbonation par rapport au scénario non contraint par levier d'action (sobriété sur les usages, efficacité accrue, transfert technologique...), et d'évaluer pour chaque levier sa contribution à la réduction des émissions, son coût moyen, et donc son coût d'abattement des émissions moyen.

Enfin, par une méthode de pondération permettant d'éviter tout double-compte dans la contribution concomitante des différents leviers, le calcul permet d'évaluer le gisement de réduction des émissions attribuable à chacun des leviers.

Entrées	<p>Les entrées du modèle, très nombreuses, comprennent l'ensemble des hypothèses à prendre en compte pour le paramétrage d'une trajectoire.</p> <p>On peut distinguer :</p> <ul style="list-style-type: none"> les hypothèses démographiques ou macro-économiques, qui interviennent de façon exogène. Le taux de croissance est déformé sur les secteurs primaire, secondaire et tertiaire, et pour le tertiaire une hypothèse sur le degré de circularité (réparation, augmentation de la durée de vie...) permet de modérer la demande de biens matériels. Le modèle prend aussi en compte un paramètre sur la part des dépenses des ménages consacrée à l'alimentation ou à l'achat de produits manufacturés, qui peut être un peu découpé du PIB ; les hypothèses relatives aux caractéristiques des différents processus et options de décarbonation pris en compte (performances; coûts...), qui interviennent directement dans l'optimisation. <p>La demande de biens et de services est également fournie au modèle de manière exogène.</p>
Sorties	<p>Le modèle propose deux niveaux de sorties.</p> <p>En premier lieu, le solveur propose des sorties directes correspondant à la caractérisation d'un scénario, c'est-à-dire du résultat de l'optimisation selon les hypothèses et contraintes fixées. Il fournit une description de trajectoire, détaillée par volet et secteur, et des coûts d'abattement marginaux des émissions associés aux différentes options de décarbonation mobilisées.</p> <p>Ensuite, le comparateur permet d'illustrer l'écart entre deux scénarios, typiquement une trajectoire de référence versus une trajectoire bas-carbone. Il fournit alors le calcul des coûts d'abattement moyens et la décomposition de la réduction des émissions en gisements associés aux différents leviers.</p> <p>Les résultats sont représentés sous forme graphique, par des « courbes en coin » dynamiques, qui illustrent la contribution, au fil du temps, des différents leviers à la baisse des émissions.</p> <p>À terme un coût d'abattement total par gisement devrait pouvoir être calculé.</p>

Détail	
Module spécifique	Focus sur le bâtiment (secteur bâtiment et intersectorialité)
Périmètre technique	Bâtiments Le secteur bâtiment du modèle TITAN recouvre l'ensemble du secteur résidentiel et du secteur tertiaire, qu'il divise en quatre « modes » : maison individuelle, habitat collectif, HLM et tertiaire. Chaque mode est caractérisé par un nombre total d'unités au sens d'un bâtiment type, représentatif de la moyenne de la surface de plancher, des caractéristiques et performances du mode considéré.
Usages	Le modèle couvre l'ensemble des usages de l'énergie dans les bâtiments : chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire (ECS), cuisson et électricité spécifique.
Population	Voir modèle général.
Périmètre géograph.	Échelle Voir modèle général. Territoire Voir modèle général.
Périmètre temporel	Horizon Voir modèle général. Pas temporel Voir modèle général.
Principes de calcul	<p>Pour le volet bâtiment, l'optimisation couvre l'ensemble des usages de l'énergie dans les bâtiments (chauffage, climatisation, ECS, cuisson et électricité spécifique) et sur un ensemble d'actions qui peuvent intervenir sur le stock de bâtiments et d'équipements générant ces usages :</p> <ul style="list-style-type: none"> les rénovations, avec le détail des étapes et une évolution selon les classes du Diagnostic de performance énergétique (DPE). Le taux de rénovation n'est toutefois pas paramétré en tant que tel. Le modèle est encore en cours de calage et de validation sur ce point, les rénovations s'arrêtant en l'état aux classes C ou D ; la construction, avec la possibilité de paramétriser le niveau de performance des nouveaux bâtiments, jusqu'à un standard à énergie positive. Pour les logements, le paramétrage est basé sur une projection démographique de l'INSEE, croisée avec un taux de cohabitation (nombre de personnes par foyer) pour identifier les besoins de nouvelles surfaces, et avec un taux de réutilisation du bâti existant. Le

	<p>coût capté par le modèle est celui du «surcoût» lié à l'objectif de performance plutôt que le coût de construction total;</p> <ul style="list-style-type: none"> les achats d'équipement de chauffage (avec des hypothèses simplificatrices, liant par exemple le système de chauffage et d'ECS); <p>Le modèle n'intègre en revanche pas d'hypothèses explicites sur l'évolution des équipements relatifs à la cuisson et à l'électricité spécifique, qui ne sont optimisés que sous l'angle de la consommation d'énergie.</p> <p>Outre les caractéristiques en termes de performance et de coûts, le modèle permet de paramétrier des contraintes sur certaines technologies, comme par exemple l'exclusion du chauffage au charbon.</p> <p>Le modèle fonctionne par défaut sans élasticité: les besoins sont paramétrés dans le bâtiment (et dans tous les secteurs) sans effet rebond. Le besoin de chauffage est par exemple normalisé et indexé à une caractérisation volumique des bâtiments à chauffer.</p> <p>À noter que le modèle opère un couplage entre chauffage, climatisation et rénovation. Les PAC peuvent être réversibles, et le besoin de climatisation diminue avec la rénovation. Il tient compte de l'apport thermique des habitants et de l'électro-ménager, et embarque donc des hypothèses implicites sur la qualité bioclimatique des bâtiments.</p> <p>Les besoins de construction sont croisés avec le paramétrage du secteur Terres, basé sur des postulats relatifs à l'usage des sols et à la renaturation des sols, avec des coûts consolidés.</p>
Entrées	<p>Le volet bâtiment est traité comme l'ensemble du modèle, avec des hypothèses exogènes sur le cadrage macro-économique communes à tous les secteurs, et un paramétrage des coûts et des caractéristiques des technologies spécifiques au secteur bâtiment.</p> <p>Le modèle fonctionne avec énormément d'hypothèses. Pour le secteur du bâtiment, les plus importantes portent sur la constitution du parc immobilier, sur la répartition du parc en classes énergétiques, sur le coût de chaque énergie, sur le rythme de rénovation et la nature des étapes de rénovations, sur le niveau de construction, et sur l'évolution du climat.</p> <p>La demande en services énergétiques répondant aux différents usages dans les bâtiments est enfin fournie au modèle de façon exogène.</p>
Sorties	<p>Les sorties du modèle pour le secteur bâtiment sont de même nature que celles décrites pour le modèle général, avec la possibilité de les traiter de façon intégrée ou en mode mono-sectoriel.</p>
Éléments de discussion	
Points forts	<p>L'optimisation proposée par TiTAN est basée sur une représentation technico-économique explicite, et n'intègre que très peu d'élasticité, ce qui réduit considérablement le nombre d'équations par rapport à des modélisations de type TIMES, évitant l'effet de boîte noire. Cela introduit nécessairement une simplification, mais apporte plus de transparence et permet de décrire le champ des possibles.</p> <p>Cette optimisation est omnisciente, c'est-à-dire qu'elle s'opère à tout instant de la trajectoire en connaissance de sa suite, ce qui répond à un besoin de cohérence de mise en œuvre de la transition et de planification de l'action.</p> <p>Du point de vue de la cohérence, l'outil est particulièrement adapté à l'analyse des effets intersectoriels, ce qui permet d'interroger la répartition des «efforts marginaux» entre les différents secteurs et les différents leviers: par exemple, il permet de mesurer les implications pour les autres secteurs d'un effort moindre sur l'isolation des bâtiments, ou de discuter l'équilibre entre les efforts de sobriété et d'efficacité d'un côté et de décarbonation des vecteurs énergétiques de l'autre.</p> <p>Enfin, l'optimisation est basée sur les coûts, et non sur les prix, pour éclairer la trajectoire d'optimum économique du point de vue de la société indépendamment des effets liés aux prix sur sa mise en œuvre. Plus généralement, la description en termes techniques des trajectoires permet de s'affranchir de la question des modalités de leur mise en œuvre. Le modèle permet ainsi d'explorer un large champ des possibles, en modélisant non pas les politiques publiques de décarbonation elles-mêmes mais leurs effets attendus, pour en informer l'ambition.</p>
Questionnements et développements	<p>Limites de l'optimisation</p> <p>D'une manière générale, il est essentiel pour utiliser à bon escient un modèle comme TiTAN de comprendre les limites de son calcul d'optimisation.</p> <p>Par exemple, l'optimisation proposée s'inscrit dans une vision cohérente à long terme aveugle aux contraintes et politiques conjoncturelles et aux fluctuations de court terme qu'elles engendrent.</p> <p>L'optimisation est par construction technico-économique, et le modèle ne propose aucun bouclage macro-économique. Il intègre des évolutions structurelles profondes à long terme de l'économie mais ne se prononce pas sur leur lien avec la croissance. Il ne traite pas directement de la création de valeur, même s'il permet par exemple de paramétriser la valeur d'un vélo de 10 ans ou d'un vélo de 30 ans, et sur le coût d'entretien associé. Il aboutit à un PIB en valeur qui n'est pas le même qu'en entrée, et qui se trouve déséquilibré par les inputs de base, mais renvoie aux économistes la question du bouclage à long terme.</p> <p>L'optimisation ne porte par ailleurs que sur la contrainte carbone, ce qui ne permet pas de prendre en compte d'autres externalités que le changement climatique. La question des ressources minérales, en particulier des métaux, mériterait d'être prise en compte mais à court terme au moins, ce sujet n'est pas regardé. Il pourrait l'être ponctuellement: une réflexion est par exemple en cours sur l'intégration des batteries dans le volet électricité, ce qui permettrait d'introduire une contrainte sur les ressources nécessaires, qui n'est pas introduite en l'état du modèle.</p> <p>Sur la question des ressources énergétiques, le modèle ne fixe pas de limites sur la possibilité d'importer des énergies fossiles mais intègre un paramétrage sur la quantité de biomasse disponible (pour l'ensemble des usages), dans le cadre du paramétrage de l'ensemble du secteur Terres – qui est le seul à être intégralement traité par du paramétrage, n'étant pas intégré à l'optimisation.</p> <p>Plus largement, l'approche, centrée sur les émissions de gaz à effet de serre laisse au second plan des problématiques importantes telles que les effets sur l'emploi, la biodiversité, la qualité de l'air. Certains effets sur l'emploi et la qualité de l'air pourront être pris en compte dans des versions ultérieures. Concernant la biodiversité, le modèle prend en compte explicitement certaines contraintes techniques ou économiques jugées nécessaires pour que la transition climatique soit cohérente avec une réduction des impacts dans ce domaine.</p> <p>L'outil cible de plus les émissions de GES territoriales et nationales, excluant donc les calculs dits d'empreinte carbone, au moins dans sa version actuelle. L'intégration des émissions de la consommation pourra faire l'objet de développements ultérieurs, même si elle demande des hypothèses fortes sur l'évolution de la structure économique mondiale à long terme. De même, seuls</p>

les coûts de l'atténuation du changement climatique sont pris en compte, et non les coûts de l'inaction, qui eux s'apprécient à l'échelle mondiale, via des approches spécifiques.

Enjeux sur la demande

Concernant la sobriété, il y a plusieurs moyens de l'intégrer. La demande étant fixée de manière exogène, on peut paramétriser une division par deux de la consommation d'énergie. On obtient ainsi un proxy de l'optimum d'atteinte de l'objectif carbone dans cette configuration. Des contraintes sur les usages peuvent également être intégrées dans le paramétrage. En calcul de coûts d'abattements, la sobriété n'est toutefois pas traitée par un coût d'abattement systémique.

La sobriété embarque de nombreux éléments, elle implique de la part de l'utilisateur qu'il pousse certaines hypothèses. Elle peut être embarquée pour le chauffage dans des hypothèses sur l'équipement et la température de consigne, mais plus difficilement pour l'ECS; pour la climatisation, on différencie le taux d'équipement dans le temps entre scénario de référence et bas carbone.

Pour l'électricité spécifique, le modèle utilise directement des hypothèses de demande, qui embarquent donc l'efficacité et la sobriété sans les différencier – on pourrait en principe le faire, mais cela n'apporterait pas beaucoup de valeur ajoutée.

Il est par ailleurs possible d'introduire par le paramétrage une forme d'élasticité: on peut par exemple, sur le chauffage, paramétriser une part de population vertueuse, ou une possible anticipation des factures énergétiques par les ménages (les prix peuvent être paramétrés dans le modèle, indépendamment des coûts sur lesquels s'appuie l'optimisation). On peut à l'inverse paramétrier un coefficient d'élasticité renforcée pour la population précaire.

Enfin, vis-à-vis des enjeux d'artificialisation liés à l'évolution du parc bâti, le paramétrage de la demande permet d'intégrer une hypothèse relative à la sobriété d'usage des sols.

Couplages intersectoriels

Des couplages intégrés sont paramétrables entre tous les secteurs optimisés (c'est-à-dire hors Terres). On peut ainsi obtenir des coûts d'abattement intersectoriels, mais qui n'embarquent pas les enjeux associés à la biomasse et à sa disponibilité ni aux sols.

C'est par ailleurs compliqué de faire correctement certains couplages intersectoriels, par exemple on ne sait pas écrire une relation linéaire entre le secteur du bâtiment et celui des transports pour traiter d'une option comme le télétravail. On peut néanmoins traiter par exemple un levier comme la mutualisation assez simplement, dans le nombre de personnes par ménage, sans établir de lien entre les secteurs bâtiment et transports.

Parmi les couplages identifiés, le modèle permet par exemple de veiller à ce que le développement de la rénovation n'entraîne pas un déclin trop rapide du secteur industriel de la construction, ou de caractériser le développement des matériaux biosourcés dans l'industrie – ce type de couplage est introduit à la main sous forme de relations établies entre les tableurs.

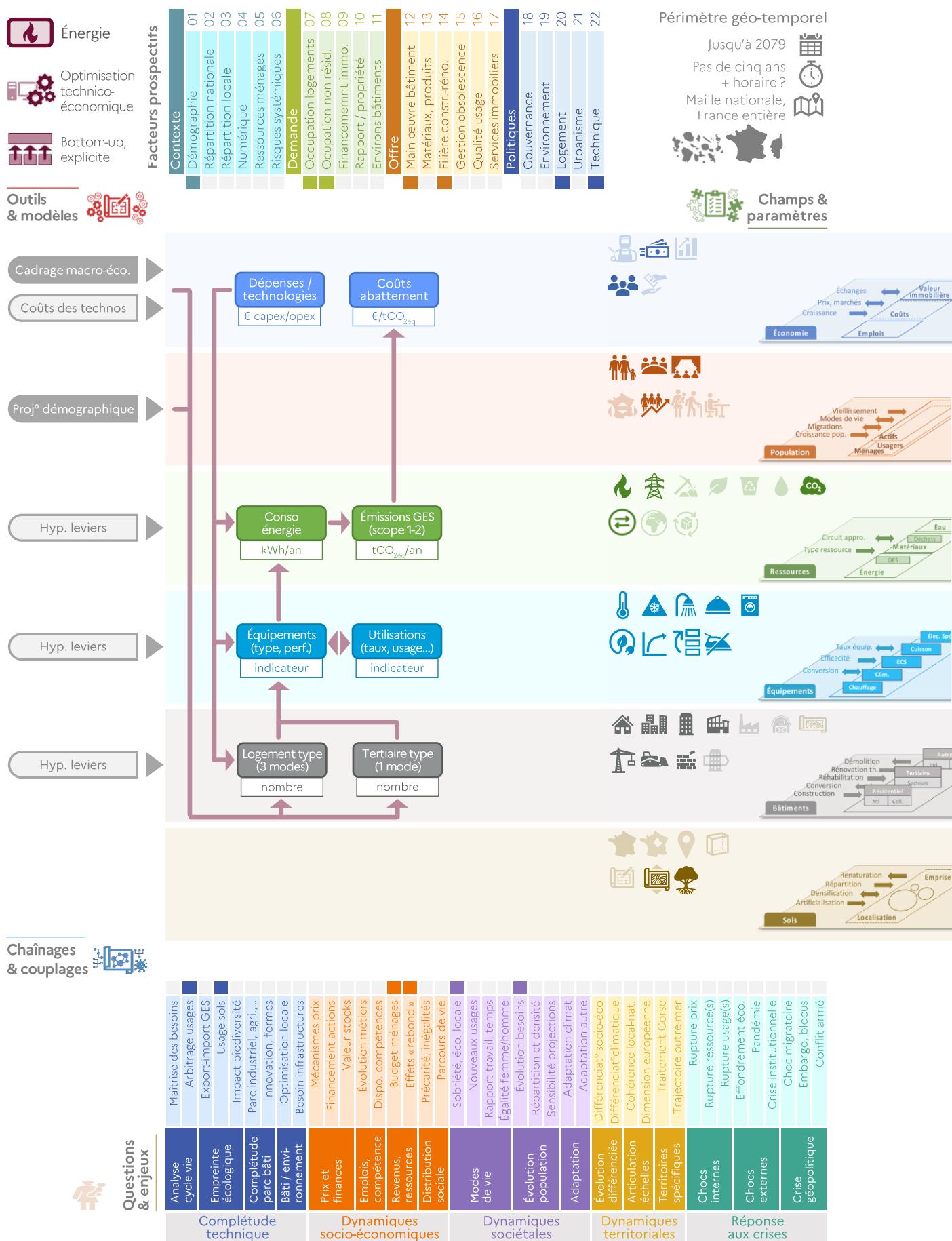
L'hypothèse de réindustrialisation est traduite à l'heure actuelle par le paramétrage du taux d'exportation et d'importation de biens manufacturés par grande filière. Il est prévu d'en faire ultérieurement une variante.

Besoins identifiés	Données	D'une manière générale, le bon fonctionnement du modèle nécessite de parfaire la description des différentes données. Par exemple, le classement des bâtiments en classes A à G repose uniquement sur la porosité thermique des enveloppes. Sur l'évolution du climat, le modèle est calé sur le climat de l'année 2006 : il est utilisé comme référence et appliqué à l'année zéro du calcul d'optimisation, soit 2019 ; ensuite, le réchauffement est par défaut modélisé via une dérive linéaire de la température moyenne, atteignant +0,5°C à 2050. Une modélisation plus précise, tenant compte d'évolutions contrastées pourrait être envisagée. Le modèle utilise une courbe de charge type par usage. Elle est modifiée avec l'introduction des PAC, mais il s'agit sinon de la même courbe pour toutes les technologies. Sa forme ne dépend pas non plus de la classe d'isolation des bâtiments, ce qui est largement perfectible.
Méthode		Il n'est pas prévu à ce jour d'intégrer les enjeux relatifs à l'évolution de la population (hors hypothèse d'entrée démographique utilisée par le modèle). Il est toutefois possible en théorie de complexifier le modèle en augmentant le nombre de régions, pour différencier par exemple les évolutions par rapport à la latitude ou à la densité urbaine.

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil plutôt orienté énergie – bien qu'il intègre d'autres éléments pour décrire l'évolution globale des émissions de GES – couvrant l'ensemble des secteurs économiques et plus spécifiquement le bâtiment (résidentiel et tertiaire), décrits sous l'angle technico-économique, et proposant une optimisation des coûts dans le respect d'un niveau donné de contrainte carbone.
	Champs et paramètres	Le modèle, de par sa nature intersectorielle et interdimensionnelle, touche à l'ensemble des dimensions mobilisables pour une modélisation du secteur du bâtiment. Il se concentre toutefois, dans sa logique fondée sur la description des technologies, sur les dimensions relatives aux bâtiments, aux équipements et aux ressources, qui viennent informer différents éléments s'inscrivant dans la dimension population (croissance et taille des ménages) ou la dimension économie (coûts, investissements...), qui reste par ailleurs celle où s'expriment in fine ses principaux résultats. Enfin, l'interaction avec le secteur des terres touche directement à la dimension sols.
	Chaînages et bouclages	Par construction, le modèle TiTAN recherche une forme de complétude et d'auto-portance antagoniste de l'approche par chaînage et couplage de modèles plus spécialisés. Toutefois, son approche intersectorielle, sur le long terme et technico-explicite implique d'importantes simplifications, assumées par le modèle, qui appellent à travailler sa complémentarité avec les modèles existants plus fins sur chacun de ses secteurs, au premier rang desquels celui du bâtiment.
	Questions et enjeux	L'outil TiTAN peut être relié à plusieurs nouveaux questionnements, même s'il n'est parfois pas évident d'imaginer la manière dont il pourrait y répondre davantage. En premier lieu, il touche de manière directe l'enjeu de l'arbitrage entre différents usages, inclus en matière d'usage des sols. Il peut également informer des enjeux relatifs à l'économie, autour de la question du budget des ménages par exemple, ou encore de profondeur de la sobriété et d'évolution des besoins.

TITAN (CGDD)



A17. IMACLIM-R (CIRED)

Outil		
Modèle / outil	IMACLIM-R	Ce modèle propose une simulation économique de politiques et mesures et de trajectoires de décarbonation, couplant leur description technique avec l'évaluation de leur impact macroéconomique.
Porteur(s)	CIRED	
Développeur(s)	CIRED, réseau IMACLIM	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	—	
Prise d'information	Entretien conduit le --/-/2023. Fiche validée le --/-/2023.	
Ressources	Modèle général : https://www.iamcdocumentation.eu/Model_Documentation_-_IMACLIM Modèle à l'échelle nationale : https://hal.science/hal-02949396/document	
Modèle général		
Finalité	Cet outil permet une simulation dynamique de différents impacts économiques associés aux transformations techniques des modes de production et de consommation de l'énergie.	
Type d'outil	IMACLIM-R est un modèle hybride, technico-économique et économétrique, d'équilibre général de l'économie permettant de simuler, selon un mode de calcul récursif, les impacts macro-économiques des transformations liées à la production et à la consommation d'énergie. Le modèle, développé par le CIRED dans le cadre d'un réseau académique de partenaires pour sa version originale mondiale, et avec le soutien de partenaires institutionnels et économiques pour sa déclinaison française, est implémenté dans Scilab et utilise un solveur C++.	
Champ de modélisation	La modélisation IMACLIM-R vise à proposer un cadre macroéconomique cohérent pour évaluer la relation entre l'énergie et l'économie, et modéliser les impacts associés aux changements survenant dans le secteur de l'énergie, du côté production et consommation, aussi bien au niveau macroéconomique (compétitivité, croissance...) qu'au niveau microéconomique (dépenses d'énergie des ménages...).	
Usage type / périodicité	Ce modèle est issu d'un développement porté depuis les années 1990 à travers le Réseau IMACLIM par une communauté internationale de chercheurs dont les outils ont cherché à accompagner les progrès des négociations de la Convention Cadre des Nations-Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC), et notamment à informer et évaluer les contributions des différentes parties en regard d'objectifs ambitieux tels que ceux qui ont entre temps été adoptés dans l'Accord de Paris. Ce réseau a permis de développer la modélisation IMACLIM-R , qui s'applique à l'économie mondiale, découpée en grandes régions et en secteurs. Si les premières analyses menées à l'échelle française dans le cadre des travaux du CIRED remontent à la fin des années 1990, c'est en 2012, à l'occasion du Débat national sur la transition énergétique (DNTE), qu'une version unique et ouverte du modèle global a été calibrée pour la France pour permettre, en y intégrant une description détaillée du système énergétique français, d'analyser les scénarios de transition. Le modèle IMACLIM-R France est depuis régulièrement mobilisé pour contribuer à l'évaluation macroéconomique des scénarios de transition ou de différentes politiques structurantes relatives à la transition énergétique.	
Architecture	La démarche de modélisation proposée par IMACLIM-R cherche à articuler une représentation macroéconomique de l'économie représentative à la fois d'un moteur de croissance à long terme, porté par la croissance démographique et le croissance de la productivité du travail, et des frictions pouvant survenir à court terme du fait d'anticipations imparfaites, d'inerties techniques, sociétales ou financières, etc. L'évolution de l'économie est ainsi décrite comme une succession d'équilibres statiques représentant chaque année un bilan économique (production, consommation, échanges), évoluant sous l'effet de dynamiques liées d'une part au progrès technique, d'autre part à l'évolution des facteurs de production (le capital, le travail et les ressources naturelles). En termes d'architecture, la spécificité introduite à son origine par IMACLIM-R consiste ainsi à combiner deux approches jusque là séparées, pour permettre d'intégrer des hypothèses sur les transformations techniques, telles qu'elles peuvent être construites dans des modèles techno-explicites « bottom-up », dans des trajectoires économiques simulées par l'approche économétrique « top-down ». Pour ce faire, le modèle est basé sur une description explicite de l'économie à la fois en valeurs monétaires et en quantités physiques liées par un vecteur de prix. Le modèle articule dès lors, selon une structure récursive, deux types de modules :	
	<ul style="list-style-type: none"> • un module d'équilibre statique annuel, avec des stocks d'équipements fixes et une intensité fixe du travail, de l'énergie et d'autres ressources intermédiaires, mais avec un taux d'utilisation flexible, dont la résolution à l'année N fournit l'instantané de l'économie à cette date. Celui-ci produit un ensemble d'informations sur les prix relatifs, les niveaux de production, les flux physiques et les taux de rentabilité pour chaque secteur et la répartition des investissements entre les secteurs; • des modules dynamiques, dont l'un porte sur la démographie, un autre sur la dynamique du capital, mais qui portent surtout sur la description des secteurs. Ils modélisent les secteurs riches en technologie, et prennent en compte, avec une flexibilité dans les choix techniques mais une inertie par rapport aux choix techniques passés, la réaction des systèmes techniques à l'équilibre statique de l'année N pour produire les informations nécessaires au calcul, par le module précédent, de l'équilibre à l'année N+1. 	
	Les équations du modèle se répartissent par ailleurs en différents blocs : le système de prix et la génération des revenus, les comptes des secteurs institutionnels, la production et les arbitrages des ménages en termes de consommation, et les équilibres de marché. Les agents économiques peuvent être décrits de façon plus ou moins détaillée, pour refléter ou non leur hétérogénéité : par exemple,	

		<p>les ménages peuvent être désagrégés par catégorie de revenus, pour tenir compte de différences de comportement et de capacité à agir.</p> <p>L'outil développé au périmètre français est basé sur le modèle général IMACLIM-R à l'échelle mondiale, historiquement divisé en 12 régions et 12 secteurs et calibré, pour son année de référence 2001, sur la matrice de comptabilité sociale (MSC) équilibrée fournie par la base de données GTAP-6, qui divise l'économie mondiale en 87 régions et 57 secteurs.</p> <p>C'est sur cette base que le modèle IMACLIM-R pour la France a fait l'objet d'un calibrage dédié. Il est recalé en 2004 et propose une désagrégation de l'économie focalisée sur 13 secteurs : l'énergie (pétrole brut, pétrole raffiné, gaz, charbon et électricité), le transport (transport routier de marchandises, transport par voie d'eau, transport aérien, transport collectif de personnes), la construction, les industries intensives en énergie, l'agriculture et les services.</p>
Rythme d'actualisation		<p>La modélisation IMACLIM-R se décline dans différentes régions, et potentiellement dans d'autres pays comme en France, où elle peut faire l'objet d'utilisations diverses, en lien avec les programmes de recherche académiques et les sollicitations institutionnelles. Le modèle ne fait à ce titre pas l'objet d'un programme établi d'actualisation périodique, mais plutôt d'un processus d'enrichissement plus ou moins permanent.</p>
Périmètre technique	Bâtiments	<p>Son périmètre d'application portant sur l'ensemble de l'économie française, le modèle couvre bien sûr l'ensemble du secteur du bâtiment, aussi bien résidentiel que tertiaire. Son module résidentiel est une version intégrée du modèle ResIRF.</p>
	Usages	<p>De même, l'outil couvre par son périmètre l'ensemble des activités associées au bâtiment, qu'il s'agisse du registre de la construction, de la rénovation, de l'occupation des bâtiments pour des activités de production, de services ou par les ménages, et des activités immobilières et financières associées. Sous l'angle de l'énergie, c'est toutefois essentiellement le secteur tertiaire et résidentiel et leur consommation d'énergie qui sont décrits dans le modèle.</p>
	Population	<p>Le modèle intègre un module dynamique consacré à la démographie, qui décrit la population et son évolution, essentiellement sous la forme économique de ménages qui génèrent la demande finale, et de part de la population active.</p>
Périmètre géograph.	Échelle	<p>Le modèle IMACLIM-R est à l'origine un modèle mondial, décliné en modèles régionaux, et qui a fait l'objet pour les besoins du débat sur la transition énergétique en France d'un calibrage à l'échelle nationale.</p>
	Territoire	<p>Cette version calibrée pour la France couvre le territoire métropolitain.</p>
Périmètre temporel	Horizon	<p>Le modèle développé initialement à l'échelle mondiale est dimensionné pour fournir des trajectoires courant de son année de référence, 2001 jusqu'à l'année 2100. La version calibrée pour la France est recalée à cette échelle sur une année de référence 2004 et conçue, dans le cadre des débats français sur les objectifs climatiques à 2050, pour produire des trajectoires à cet horizon.</p>
	Pas temporel	<p>Le calcul récursif est réalisé au pas annuel.</p>
Principes de calcul		<p>Techniquement, le modèle IMACLIM-R offre un cadre de simulation dynamique récursif. Il génère une trajectoire économique, sous l'angle de l'énergie, en résolvant des équilibres statiques annuels successifs de l'économie, reliés par des modules dynamiques. Il peut ainsi modéliser l'évolution de l'économie sur la période 2001-2100, par pas de temps d'un an.</p> <p>La demande de chaque bien provient de la consommation des ménages, de la consommation des administrations publiques, de l'investissement et des emplois intermédiaires des autres secteurs de production. Cette demande peut être satisfaite soit par la production nationale, soit par les importations, et tous les biens et services sont échangés sur les marchés mondiaux. Dans l'équilibre statique, le marché national et les marchés internationaux, pour tous les biens, sont compensés (sans création de stocks) par un ensemble unique de prix relatifs qui dépendent des comportements des agents représentatifs (producteurs, ménages, administrations...) du côté de l'offre et de la demande. Le calcul de cet équilibre annuel détermine les variables suivantes : les prix relatifs, les salaires, le travail, les quantités de biens et de services, y compris l'énergie, les flux de valeur, les flux physiques et l'utilisation des capacités.</p> <p>Dans ce cadre général, les calculs associés à la production et à la consommation d'énergie présentent quelques spécificités. En particulier, l'énergie est systématiquement représentée en valeurs et en quantités physiques permettant d'isoler le rôle respectif des secteurs énergétiques, ainsi que leurs interactions avec le reste de l'économie. Le recours à des variables physiques associées, telles que le nombre de logements par catégorie, le nombre d'automobiles, ou le rendement énergétique des technologies et son évolution au fil des ans permettent un traitement sectoriel détaillé.</p> <p>De plus, le secteur de l'énergie est le seul où les majorations appliquées par les producteurs pour déterminer leurs prix à partir de leur coûts de production sont endogènes, en vue de refléter trois facteurs : (a) le pouvoir de marché des producteurs de combustibles fossiles, (b) les principes de tarification spécifiques au secteur de l'électricité, et (c) les différentes marges sur les trois intrants pour la production de carburants (pétrole, biomasse, charbon). Par ailleurs, alors que les autres biens intermédiaires et finaux ne sont considérés que partiellement substituables entre marché national et étranger, la comptabilité physique appliquée aux biens énergétiques les rend entièrement substituables.</p> <p>La demande totale pour chaque bien (la somme de la consommation des ménages, des investissements publics et privés et des utilisations intermédiaires) est satisfaite par un mélange de production nationale et d'importations. Les ménages choisissent leur consommation de biens et de services afin de maximiser leur utilité courante sous contrainte de revenu et de temps ; la première est la somme des salaires, des revenus du capital et des transferts, tandis que la seconde intègre en particulier un budget temps correspondant au temps total passé dans les transports.</p> <p>Les produits énergétiques sont globalement considérés comme des facteurs de production des services de mobilité et de logement : ils ne sont pas directement inclus dans les fonctions d'utilité correspondantes, mais la charge énergétique associée pèse sur la contrainte de revenu. La consommation d'énergie pour le logement découle de coefficients d'efficacité caractérisant le stock</p>

<p>existant d'équipements d'utilisation finale par mètre carré d'habitation. Dans chacun des modules les agents adaptent leurs décisions d'investissements en fonction d'anticipations qui sont imparfaites sur les prix de l'énergie, et peuvent réagir à des signaux tels que l'introduction d'une taxe carbone.</p> <p>La modélisation des comportements spécifiques des agents économiques peut ainsi être plus ou moins détaillée dans les modules sectoriels, comme c'est le cas dans le module résidentiel, qui est également développé comme modèle autonome sous la forme Res-IRF. Par exemple, le comportement des propriétaires des logements existants y est représenté au travers de fonctions de coût généralisé qui permettent de prendre en compte les investissements de rénovation thermique et/ou de changement d'équipement, et de modéliser les décisions en fonction du niveau d'efficacité visé et des économies d'énergie générées, mais aussi des paramètres comportementaux.</p> <p>Le secteur tertiaire ne fait pas l'objet d'une modélisation spécifique aussi poussée. Comme d'autres secteurs moins détaillés, il est représenté en croisant un progrès technique autonome, calibré sur les tendances passées, avec une évolution des prix de l'énergie permettant de modéliser les décisions en fonctions des gains induits par l'efficacité énergétique et les substitutions d'énergie en situation d'anticipation imparfaite.</p>	
Entrées	<p>Comme tous les modèles d'équilibre général, complexes par nature, cet outil manipule un grand nombre de données d'entrées, augmenté par les besoins d'information des modules sectoriels. Globalement, ces données d'entrée sont de quatre ordres :</p> <ul style="list-style-type: none"> • les données de calibrage du modèle d'équilibre économique, qui permettent de décrire l'ensemble des agents économiques et alimentent en coefficients techniques, d'élasticité, etc. les différentes équations mises en jeu, ainsi que le paramétrage de l'évolution du système (hypothèse exogène de croissance de la productivité du travail...); • les données relatives au calibrage des modules sectoriels, qui décrivent dans chacun d'eux l'état technique de l'offre et de la demande, et des prix relatifs, et paramètrent leur évolution tendancielle; • les hypothèses sur l'évolution de la population nécessaires au module démographique; • les hypothèses relatives aux différentes mesures soumises à évaluation, ou au scénario que l'on cherche à projeter, qui doivent se traduire dans le paramétrage d'éléments entrant dans le calcul de l'équilibre statique du module général et/ou dans le calcul dynamique des modules sectoriels.
Sorties	<p>Le modèle produit, pour chaque jeu d'hypothèses sur les évolutions techniques ou économiques du système, une trajectoire calculée selon sa méthode récursive, avec une description complète et agrégée de l'évolution de l'ensemble des paramètres. Il permet d'analyser une trajectoire donnée ou de comparer une ou plusieurs trajectoires entre elles. Les résultats portent à la fois sur l'évolution du bilan économique, synthétisée par des indicateurs macroéconomiques tels que la croissance, le pouvoir d'achat ou la balance commerciale, et sur l'évolution des secteurs explicitement décrits, avec des indicateurs physiques tels que la consommation d'énergie ou les émissions de gaz à effet de serre.</p>
Éléments de discussion	
Points forts	<p>La logique récursive du modèle structure un échange systématique entre un équilibre statique annuel « top-down » fournissant un instantané de l'économie, et des modules dynamiques « bottom-up » fournissant des informations sur l'évolution des paramètres techniques entre chaque équilibre annuel. Cette approche vise à garantir à la fois que l'économie projetée est soutenue par un contexte technique réaliste et qu'en inverse, tout système technique projeté correspond à des flux économiques réalisables et à des ensembles cohérents de prix relatifs. En particulier, ce principe de modélisation facilite l'interaction entre les considérations techniques et économiques et permet une représentation détaillée des caractéristiques sectorielles.</p> <p>De plus, l'une des principales caractéristiques d'IMACLIM-R est sa double représentation des flux économiques en flux monétaires (par exemple, en euros ou en dollars) et en quantités physiques (par exemple, tep pour l'énergie, passager.km pour la mobilité). Cette double représentation permet une représentation explicite du contenu matériel et technologique de l'activité économique et une endogénéralisation des interactions entre ces dimensions techniques et les trajectoires macroéconomiques.</p> <p>L'existence de variables physiques précises, décrivant les stocks (de logements, de véhicules...) ou les gestes (de rénovation, de changement d'équipement...) permet de décrire de façon plus précise, dans chaque secteur, l'impact d'incitations économiques sur les systèmes techniques et sur la demande finale. La modélisation des comportements et des décisions des agents économiques permet de représenter l'impact des politiques climatiques, qu'il soit directement intégré via une fiscalité carbone, des dispositifs de soutien à la rénovation thermique ou aux changements d'équipements, ou reflété dans la représentation des prix, par exemple pour des mesures liées à la sensibilisation ou encore des évolutions techniques, pour des mesures de type réglementaire.</p>
Questionnements et développements	<p>D'une manière générale, l'approche duale et récursive développée par ce modèle vise particulièrement à étudier l'impact de politiques de transition énergétique dont l'effet peut se mesurer directement sur les prix, et donc sur la modélisation de l'effet de ce signal sur les comportements d'agents ; c'est le cas par exemple de mesures fiscales comme la taxe carbone, ou de dispositifs de soutien ciblés, comme les primes ou taux d'emprunt préférentiel pour la rénovation thermique. Cette approche reflète plus difficilement l'effet d'autres types de politiques, comme la réglementation, dont l'impact est modélisé via un effet sur les options techniques proposées aux agents économiques, et sur l'évolution de leur efficacité. Il est donc important de veiller à ce que cette dissymétrie de représentation ne se traduise pas par une dissymétrie dans l'évaluation.</p> <p>Le déploiement d'un volet de modélisation sectorielle, techniquement explicite et fondamental dans cette approche mais il peut lui-même trouver des limites. Par exemple, les modules sectoriels ne couvrent pas de façon détaillée l'ensemble du système économique, ce qui peut introduire des faiblesses ; ainsi, le champ de l'énergie est couvert dans le modèle par cinq secteurs liés au pétrole, au gaz, au charbon et à l'électricité qui n'intègrent pas les énergies renouvelables non électriques, tirées de la biomasse, ou le développement possible d'un vecteur comme l'hydrogène. Par ailleurs, le découpage en secteurs ne permet pas, ou difficilement, d'intégrer dans la palette des décisions des</p>

agents économiques des éléments transversaux, tels que le recours au télétravail, ou les possibilités de conversion lors de réhabilitations entre bâtiments résidentiels et tertiaires.

Enfin, la structuration même du modèle, autour d'une hypothèse exogène de croissance tendancielle à long terme, fournit un cadre précieux d'évaluation en mode « variante », c'est-à-dire pour l'évaluation de l'impact d'une mesure ou d'un ensemble de mesures, basée sur la comparaison avec une trajectoire sans ces mesures, toutes choses égales par ailleurs. Elle peut davantage être questionnée lorsqu'il s'agit d'évaluer des scénarios complets, et de comparer une trajectoire de transition énergétique ambitieuse avec une trajectoire jugée plus tendancielle. En effet, les résultats de ces évaluations globales montrent une sensibilité à l'hypothèse exogène de croissance de la productivité du travail (projetée dans le modèle comme la poursuite tendancielle de sa progression sensiblement linéaire depuis un siècle et demi) qui peut atteindre le même ordre de grandeur que l'écart entre les scénarios. La question qui se pose alors, à laquelle le modèle ne permet pas en l'état de répondre, est de savoir si la transformation profonde décrite par les scénarios les plus ambitieux est de nature à faire évoluer différemment la productivité du travail par rapport à sa progression tendancielle (et si oui, dans quel sens)..

Besoins identifiés	Données	—
	Méthode	—

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	Le modèle IMACLIM-R est une version calibrée pour la France d'un modèle d'équilibre général calculable fondé sur une double approche de calcul d'équilibre économique top-down et de description explicite d'évolutions sectorielles en bottom-up, permettant d'évaluer les impacts macroéconomiques à l'échelle nationale de politiques ou de trajectoires de transition énergétique, à l'horizon 2050 au pas annuel.
	Champs et paramètres	L'essentiel de l'effort de modélisation de cet outil porte sur la dimension de l'économie, où il traite à la fois de coûts, de prix de l'énergie et de différents équipements, de valeur des biens immobiliers et d'emplois. Il intègre également, via ses modules sectoriels, des éléments descriptifs se rapportant aux bâtiments, aux équipements qui y sont utilisés et aux ressources énergétiques qu'ils consomment. Enfin, il comporte un module spécifiquement consacré à la population, qui n'est toutefois considérée que comme un ensemble, et représentée via une unité fonctionnelle correspondant au ménage représentatif comme agent économique.
	Chaînages et bouclages	Cet outil est conçu comme un outil intégré, qui n'a pas besoin de chaînage avec d'autres éléments pour opérer. La manière dont il est construit autour de modules sectoriels dynamiques interagissant dans le calcul récursif avec un modèle d'équilibre général statique, permet de considérer spécifiquement les possibilités de couplage avec d'autres outils des premiers, dans la mesure où ces modules sont suffisamment désagrégés ou techno-explicites. À l'inverse, comme le montre l'exemple de Res-IRF , des modules sectoriels développés dans IMACLIM-R peuvent être externalisés pour être chaînés avec d'autres modèles.
	Questions et enjeux	Même s'il n'a pas été spécifiquement développé pour répondre à des questions nouvelles, l'outil IMACLIM-R présente différents aspects intéressants par rapport aux questions et enjeux identifiés dans le cadre de l'étude. Tout d'abord, même si l'approche désagrégée et explicite de ses modules sectoriels n'interdit pas des ouvertures vers les sujets de complétude technique, c'est évidemment du côté des dynamiques socio-économiques que des points d'appui peuvent être envisagés. Ce modèle semble en effet se prêter à explorer davantage des sujets relatifs à la dimension financière, et à l'articulation entre les prix, les conditions de financement et la valeur du patrimoine immobilier ; il traite déjà la question du poids de l'immobilier dans le budget des ménages mais pourrait peut-être, moyennant des renforcements sur les catégories de ménages à prendre en compte comme agents économiques, aller davantage sur la question des inégalités. Il présente par ailleurs, du point de vue des dynamiques sociétales , l'intérêt de prendre en compte un indicateur de budget temps, tout en représentant l'économie marchande et l'économie non marchande, ce qui devrait permettre d'explorer davantage les enjeux de rapport au travail et au temps. Enfin, sous l'angle de la réponse aux crises , sa méthode de modélisation est a priori conçue pour envisager la réponse à un choc de prix ou de politique publique. Il est donc apte à envisager des situations de ce type, sous réserve cependant en l'état qu'elles puissent être traduites dans des termes appréhendables par le modèle (c'est-à-dire sous forme de prix) et qui ne soient pas suffisamment disruptifs pour remettre en cause le cadre de long terme sur lequel repose le calcul d'équilibre du modèle.

A18. Res-IRF (CIRED / ENPC)

Outil		
Modèle / outil	Res-IRF	<i>Ce modèle permet une simulation de l'évolution du stock de logements et de sa consommation d'énergie en fonction du comportement des acteurs face aux politiques mises en place en matière notamment de rénovation thermique.</i>
Porteur(s)	CIRED	
Développeur(s)	CIRED	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Louis-Gaëtan GIRAUDET Directeur de recherche - École des Ponts Chercheur - CIRED Lucas VIVIER Doctorant - CIRED	louis-gaetan.giraudet@enpc.fr vivier@centre-cired.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 28/02/2023. Fiche validée le 19/08/2024.	
Ressources	https://www.centre-cired.fr/res-irf/	
Modèle général		
Finalité	Res-IRF contribue à l'évaluation des politiques publiques et alimente les travaux de la Stratégie nationale bas carbone(SNBC) et de la stratégie française énergie et climat(SFEC) sur le secteur résidentiel, en proposant notamment une projection de l'impact de politiques de rénovation et de construction sur l'évolution des consommations d'énergie du secteur résidentiel.	
Type d'outil	Il s'agit d'un modèle intégré technico-économique permettant une simulation basée sur le comportement des acteurs face à différents signaux.	
Champ de modélisation	L'outil Res-IRF porte sur la consommation de chauffage des logements et son évolution en fonction de l'évolution de leur performance énergétique et des usages.	
Usage type / périodicité	<p>Le modèle a deux usages principaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> l'évaluation des politiques publiques. Il a notamment été mobilisé en trois occasions : la 1^{ère} était le Grenelle de l'environnement en 2007, la 2^{ème} portait sur la Stratégie nationale bas carbone(SNBC) n°2, et il est utilisé pour la préparation de la SNBC n°3, comme contribution à la Stratégie française énergie-climat(SFEC) ; la recherche. Il est utilisé pour la production d'études et d'articles de recherche portant notamment sur l'efficacité des politiques publiques menées sur son domaine d'application(les publications correspondantes sont accessibles via le site de l'outil). <p>Par ailleurs, Res-IRF sert également de module résidentiel au modèle IMACLIM-R France.</p>	
Architecture	<p>L'outil RES-IRF modélise l'impact des politiques publiques sur les acteurs économiques du logement. Il permet de modéliser les rythmes de rénovation et de construction et d'en déduire des consommations énergétiques à partir de données d'entrées sur le stock de logements et en croisant des paramètres techniques et comportementaux d'évolution de ce stock, qu'il calcule au pas d'une ou plusieurs années selon une logique incrémentale.</p> <p>Le modèle est par ailleurs développé sur financement public et disponible en open-source. La documentation, le code source et un outil de visualisation sont à ce titre disponibles sur le site du modèle.</p>	
Rythme d'actualisation	<p>Le modèle évolue au rythme des révisions de la SNBC / SFEC pour son application institutionnelle, mais plus largement en continu pour les travaux de recherche. Le modèle a été développé par Louis-Gaëtan GIRAUDET dans le cadre de sa thèse. Il a fait l'objet de nouveaux développements sur la période 2015-2018. Dernièrement, il a fait l'objet de nouveaux développements, visant à produire une quatrième version de l'outil, dans le cadre de la thèse de Lucas VIVIER..</p> <p>L'équipe est par ailleurs intégrée à une communauté académique d'acteurs et de chercheurs à l'échelle internationale (IMACLIM).</p>	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre l'ensemble du parc résidentiel, hors logements vacants et résidences secondaires. De plus, les logements à titre gratuit ne sont pas pris en compte.
	Usages	Le modèle couvre l'ensemble des consommations d'énergie des logements, toutes énergies et tous usages compris. Leur degré de modélisation est toutefois différent selon les usages. La consommation de chauffage est modélisée sur la base d'un modèle 3CL-DPE. Les consommations d'eau chaude sanitaire(ECS) sont estimées et celles de climatisation négligées (un travail est en cours pour ajouter un module de calcul sur ce point) pour aboutir au périmètre de trois usages de l'ancien diagnostic de performance énergétique(DPE). Pour l'expression des consommations d'énergie au périmètre du nouveau DPE les autres usages sont ajoutés de façon exogène.
	Population	L'outil prend en compte l'ensemble de la population à l'année de départ, et permet d'intégrer une hypothèse de croissance démographique, qu'il croise année après année, selon un calcul incrémental, avec les paramètres d'évolution du parc pour déterminer les besoins.
Périmètre géograph.	Échelle	Le modèle est calé sur un calcul à l'échelle nationale, mais pourrait en théorie être utilisé à d'autres échelles. Il est "input agnostique", c'est-à-dire qu'il travaille par nature au périmètre auquel on lui fournit le jeu de données dont il a besoin, que ce soit au niveau infra-national ou européen.
	Territoire	L'outil est calibré et principalement utilisé sur la France métropolitaine.
Périmètre temporel	Horizon	L'outil est plus pertinent sur le temps long que sur le court terme. Néanmoins, le modèle reproduit assez fidèlement les évolutions de court terme. L'horizon de temps auquel il est utilisé est variable, mais il est typiquement de 2030 et 2050 pour la SFEC.
	Pas temporel	Le pas de temps est variable également : 1, 2 ou 5 ans. Le pas de 1 an est conseillé, mais des pas plus longs permettent de réduire le temps de calcul pour des tests de variantes par exemple.
Principes de calcul	<p>RES-IRF modélise l'impact des politiques publiques, de la démographie, du PIB, du revenu des ménages, des coûts de l'énergie etc. sur le rythme de construction neuve et de rénovation du secteur résidentiel. Il en déduit les consommations énergétiques.</p> <p>Le cœur de l'outil est un jeu de données de référence composé de 150 000 « agents économiques » représentant les ménages par catégorie d'occupation (propriétaire occupant, bailleur, bailleur social,</p>	

copropriété), par typologie (maison individuelle ou logement collectif), par catégories de revenus des propriétaires et des occupants si ils sont différents (segmentés en déciles ou en quintiles). Ces catégories sont pondérées de leur représentativité nationale.

Par ailleurs les logements sont décrits par les déperditions (valeur U) du sol, mur, toiture, fenêtre et par leur système de chauffage principal (les chauffages d'appoints ne sont pas modélisés).

Le point de départ en termes de consommations de chauffage (calcul 3CL-DPE) est calibré pour reboucler avec les données nationales du CEREN.

L'unité fonctionnelle du calcul est ainsi une paire logement + ménage. Deux processus sont alors pris en compte :

1) Croissance du stock : le besoin en logement suit la démographie (l'hypothèse de cohabitation peut être soit endogène par un modèle lié au revenu, soit exogène sous forme de chronique – ce qui est plutôt l'option conseillée) et la hausse générale du revenu (le modèle considère que l'augmentation du PIB fait augmenter la surface par habitant – il est aussi possible de fournir des données exogènes par exemple pour modéliser des mesures de sobriété).

Le rythme de destruction de logement est une entrée exogène. Le solde est le besoin en construction neuve. La part entre maisons individuelles et logement collectif est variable.

2) Pour la rénovation, la modélisation est endogène : l'outil modélise comment les agents économiques rénovent et consomment l'énergie. La décision de rénover, et le niveau de performance atteint, ainsi que l'intensité d'utilisation du système de chauffage (effet rebond etc.) sont basés sur la régression de données (issues d'EDF – toujours d'actualité, utilisées par ex dans les scénarios de RTE) à partir d'indicateurs tels que la valeur actuelle nette (VAN, dont les paramètres sont différenciés selon les acteurs : durée de la période d'analyse et taux d'actualisation) pour la première version du modèle.

Le nouveau modèle se base plutôt sur des enquêtes sur des préférences déclarées des ménages face à différentes propositions : coût de rénovation, de construction, aides et financements disponibles etc. Il s'agit d'un sondage réalisé en 2016, sur lequel est faite une régression puis une correction pour tenir compte du fait que ce n'est pas pareil de répondre à un sondage que d'investir réellement : le recalibrage est fait sur les données réelles issues de TREMI 2020, et prend en compte des «barrières intangibles» comme la crainte d'investir ou encore la gêne occasionnée par les travaux, qui sont modélisées comme des coûts supplémentaires.

De la même manière, pour le changement d'énergie, la modélisation du choix prend en compte une préférence par défaut pour garder l'énergie précédente.

Entrées	<p>Le modèle utilise à la fois des entrées globales de cadrage, et des entrées au pas de temps de sa résolution incrémentiale (annuel ou pluri-annuel).</p> <p>Les données de cadrage portent sur la population et l'évolution démographique, sur une série d'hypothèses macro-économiques telles que le taux de croissance du PIB, l'évolution moyenne du revenu des ménages ou celle du coût des énergies.</p> <p>Le modèle prend également en compte le nombre de logements, par catégorie de performance énergétique, les coûts d'investissement pour la construction de nouveaux logements, par catégorie, de même que les coûts moyens pour la rénovation ou le changement d'énergie pour le chauffage des logements existants, également par catégorie. On peut également paramétrier le niveau de chauffage, ou encore fixer des taux initiaux de répartition par catégorie des constructions ou de répartition par énergie des changements d'énergie.</p> <p>Outre l'évolution des prix et des revenus, le modèle intègre à chaque pas des données d'entrée sur les politiques publiques en place, qu'il s'agisse des taxes, des soutiens à la rénovation, de l'évolution de la réglementation sur les performances, etc. Il prend également en compte le nombre de maisons individuelles et de logements collectifs nécessaires à construire et démolis.</p> <p>L'outil peut prendre en compte sur certains paramètres des données exogènes en substitution de données internes du modèle : on peut par exemple introduire des hypothèses de cohabitation, des hypothèses relatives à l'évolution des surfaces par personne, à la part respective des maisons individuelles et des logements collectifs, ce qui peut notamment permettre de modéliser via leurs effets des mesures de sobriété.</p>
Sorties	<p>Le modèle fournit à chaque pas de temps un résultat sur le rythme et la profondeur des rénovations ainsi que l'évolution du stock de logements, par type et par performance, tenant compte de ces rénovations comme des constructions et des démolitions.</p> <p>Il calcule également les consommations d'énergie du secteur résidentiel, en agrégant les résultats qu'il modélise en détail sur le chauffage et les données normalisées exogènes qu'il applique sur le périmètre des cinq usages.</p> <p>L'outil permet par ailleurs une estimation en emploi par ratio au chiffre d'affaire, en lien avec les travaux de Philippe QUIRION sur le développement de l'outil TETE.</p> <p>Le contenu en matières premières n'est pas traité dans le modèle, mais un ratio de carbone «embodied» est intégré.</p> <p>Enfin, Res-IRF peut permettre un calcul de coût d'abattement. Toutefois CIRED préconise plutôt la comparaison coût / bénéfice, c'est-à-dire la comparaison de deux scénarios avec l'intégration des coûts du carbone, mais aussi par exemple des coûts de santé (un modèle développé pour intégrer les gains en dépenses de santé liés à la sortie de l'indécence énergétique démontre un fort bénéfice associé à la sortie des passoires thermiques), approche dont le périmètre mériterait d'être encore élargi.</p>

Éléments de discussion

Points forts	<p>L'outil va bien au-delà d'une modélisation par «comportement moyen».</p> <p>Au contraire, la force de l'outil est une décomposition fine des acteurs économiques et une approche économique et sociologique de leur prise de décision notamment en termes de rénovation, tenant compte des obstacles à la décision que constituent le dilemme entre propriétaire et occupant, la prise de décision en logement collectif, les dimensions non-énergétiques de la décision de rénovation, ou encore l'effet rebond.</p>
Questionnements et développements	<p>Les développeurs de Res-IRF ont de longue date l'envie de travailler sur le rebouclage entre les coûts de construction / rénovation et le rythme d'activité, mais cela n'a pas pu être priorisé jusqu'ici.</p> <p>Un autre enjeu important porte sur la question de la rénovation par gestes. En l'état, le modèle ne différencie pas un parcours par gestes d'une rénovation complète et performante : une fois tous les postes traités on arrive à la même performance pour le même coût. Il reste toutefois possible d'affecter un coût inférieur pour la rénovation complète (via une matrice de coûts, utilisée dans la version précédente).</p>

Un autre point de réflexion concerne la modélisation des ponts thermiques et défauts d'étanchéité à l'air liés aux interfaces mal traitées. Elle serait possible théoriquement dans 3CL-DPE, mais cela nécessiterait des données pour décrire le parc et subdiviserait les catégories de rénovation, ce qui alourdirait le calcul.

Par ailleurs, les modèles internes ne sont pas conçus pour prendre en compte des actions de sobriété, et même s'il est possible de fournir des jeux de données exogènes prenant en compte ces solutions, intégrer des politiques et mesures portant sur des leviers tels que le taux de cohabitation pourrait être intéressant. Par ailleurs, les connaissances évoluent sur l'effet rebond et nécessiteraient peut-être de faire évoluer sa modélisation.

Enfin, d'autres développements envisagés incluent (i) la prise en compte des consommations de climatisation et les interactions (antagonistes ou synergiques) entre confort d'été et confort d'hier, (ii) le lien avec les marchés immobiliers, pour évaluer l'impact notamment des interdictions de mise en location des passoires thermiques et (iii) le lien avec les marchés de la rénovation, afin d'évaluer l'impact d'un choc de demande (induit par une hausse des subventions, ou une nouvelle interdiction, etc.)

Besoins identifiés	Données	Le sondage qui modélise les choix des ménages en termes de rénovation date de 2016. Une nouvelle enquête serait souhaitable, qui permettrait d'actualiser les données mais aussi de documenter des propositions complémentaires.
Méthode	—	—

Positionnement dans la cartographie

	<i>Outils et modèles</i>	Le modèle Res-IRF est un modèle de simulation exploratoire d'énergie visant à fournir une aide à la décision sur les politiques et mesures relatives en particulier à la rénovation thermique des logements. Il traite l'ensemble des consommations d'énergie du secteur résidentiel avec un focus sur les politiques publiques relatives à la rénovation thermique, et permet des projections à l'horizon de son choix au pas de calcul incrémental annuel ou pluriannuel.
	<i>Champs et paramètres</i>	Cet outil s'appuie avant tout sur une approche descriptive en stock de la dimension bâtiments , avec une unité fonctionnelle de nombre de logements par catégorie, en fonction du type de logement et de son niveau de performance énergétique. Cette dimension est liée à celle des usages , et de la quantification des consommations d'énergie, le chauffage étant toutefois le seul usage spécifiquement modélisé. Il porte enfin sur la dimension des personnes , qui ne font cependant pas l'objet d'une modélisation mais sont traités sous forme d'agents réagissant à différents signaux dans la dimension économique , inclus les effets des politiques publiques.
	<i>Chaînages et bouclages</i>	Bien que ces aspects n'aient pas été explorés en détail, l'outil Res-IRF s'intègre dans deux logiques de modélisation et de construction de trajétoires plus larges. La première concerne la suite de modèles utilisée par la DGEC pour la construction de trajectoires énergie-climat, pour laquelle il fournit une information sur les politiques et stratégies de rénovation; la seconde porte sur son utilisation comme module relatif au secteur résidentiel dans le modèle plus large Imaclim-R.
	<i>Questions et enjeux</i>	De par son périmètre volontairement spécifique, cet outil se prête assez peu à un élargissement du questionnement. Il présente toutefois l'avantage de relier, sous l'angle des préférences d'acteurs (propriétaires ou occupants), des enjeux relatifs aux usages, aux signaux économiques et aux politiques publiques, et peut notamment à ce titre se prêter à une exploration plus approfondie de certains enjeux relatifs aux dynamiques socio-économiques , dont il traite déjà certains aspects tels que l'effet «rebond» ou la précarité. Il semble en revanche plus difficile de le relier aux autres enjeux identifiés.

A19. BTPFlux (CSTB / ADEME)

Outil		
Modèle / outil	BTPFlux	<i>Cet outil modélise de façon détaillée les consommations de matières premières et les flux de déchets générés à l'échelle du parc de bâtiments en fonction de scénarios de construction, démolition et rénovation.</i>
Porteur(s)	CSTB	
Développeur(s)	CSTB	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Edouard SORIN Ingénieur Recherche & Expertise en Economie Circulaire, Analyse Economique et Dynamique du Parc, Direction Economie et Ressources e - CSTB Mathilde LOUËRAT Cheffe de projet Atténuation du réchauffement climatique - CSTB	Edouard.SORIN@cstb.fr mathilde.louerat@cstb.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 16/03/2023. Fiche validée le 01/08/2024.	
Ressources	Entretien avec Édouard Sorin, ingénieur recherche et expertise au CSTB, chargé du développement du modèle : https://www.cstb.fr/fr/actualites/detail/projet-de-recherche-btpflux-contact-05-2023-07/ Article scientifique : https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1078/1/012027/pdf	
Modèle général		
Finalité	Le modèle BTPFlux vise à la modélisation des flux de matériaux et de déchets du bâtiment associés à différents scénarios de construction, démolition et rénovation des bâtiments.	
Type d'outil	Il s'agit d'un outil d'analyse des flux matières (<i>material flows analysis</i> , ou MFA) reposant sur une approche de description bottom-up du parc existant basée sur des archétypes constitués de macro-composants et de caractérisation technique bâtiment par bâtiment.	
Champ de modélisation	Le champ couvert est celui de la consommation de matériaux associés au cycle de vie des bâtiments, tous types de bâtiments et tous types d'action de construction, déconstruction ou rénovation confondus.	
Usage type / périodicité	Le modèle BTPFlux est issu de l'outil CONSOMAT (modèle plus ancien, sous Excel). D'abord développé pour l'ADEME île de France, BTPFlux s'applique à l'échelle nationale.	
Architecture	L'outil BTPFlux combine essentiellement trois briques développées par le CSTB : <ul style="list-style-type: none"> la Base de données nationale bâtiment (BDNB), qui agrège plus de vingt bases existantes relatives au bâtiment en France pour réunir des informations au bâtiment sur la géolocalisation, la période de construction, la forme, la structure, la consommation d'énergie, l'usage etc. de plus de 21 millions de bâtiments en France; l'outil TyPy qui consiste en une base de données rassemblant plus de 300 composants de bâtiments, avec des données détaillées sur leurs caractéristiques en termes de matériaux utilisés et de déchets associés, qui peuvent être regroupés en une centaine de macro-composants associés à différents types de bâtiments grâce à un module de gestion des typologies de bâtiments développé en langage Python; un outil de calcul géométrique qui détermine à partir des données géospaciales associées à chaque bâtiment dans la BDNB son périmètre, sa surface d'échange et le périmètre de son enveloppe. Sur cette base, le modèle BTPFlux , également développé en langage Python, permet de calculer des scénarios de construction, déconstruction et rénovation en s'appuyant sur des méthodes statistiques d'extrapolation pour étendre les résultats des calculs d'un échantillon bien caractérisé de bâtiments à l'ensemble des bâtiments d'un territoire considéré. Il permet ainsi de quantifier les déchets issus de la déconstruction et de la rénovation (par catégorie de déchet) et les coûts de traitement. Il permet également de quantifier l'ensemble des matières premières nécessaires à la construction neuve et la rénovation, mais cette dimension reste pour le moment moins développée.	
Rythme d'actualisation	Développement et amélioration en continu (selon les projets de recherche)	
Périmètre technique	La BDNB visant à couvrir tout le parc, c'est également le cas de l'outil BTPFlux . En pratique, il s'applique avant tout au secteur résidentiel, qui est mieux caractérisé. A priori les résidences secondaires sont incluses, mais pas forcément identifiées comme telles dans la BDNB. Pour le non-résidentiel, les bâtiments de bureaux et du secteur de l'enseignement sont également bien renseignés, mais les autres branches du secteur tertiaire sont moins bien documentées à ce stade. Au total, l'outil peut actuellement traiter les bureaux, l'éducation ainsi que les bâtiments industriels.	
Usages	L'outil couvre les usages relatifs à l'évolution du parc de bâtiments et traite la construction neuve, la démolition et la rénovation.	
Population	L'approche de modélisation se concentre sur les bâtiments et leur fonction, sans considérer la population concernée.	
Périmètre géograph.	Échelle	Le modèle couvre l'ensemble du territoire national mais s'applique plutôt, du point de vue de la faisabilité du calcul, à l'échelle de territoires plus restreints. Il faut à minima 15000 bâtiments pour que la logique d'échantillonnage sur laquelle repose la modélisation puisse être considérée comme significative. L'outil a été notamment utilisé à l'échelle de quatre des plus grandes métropoles françaises (Paris, Marseille, Lyon et Lille), couvrant plus de 1 à 7 millions d'habitants.
Territoire		
Périmètre temporel	Horizon	L'outil BTPFlux fournit une évaluation des flux de matériaux associés aux opérations de construction, de rénovation et de démolition conduites sur le parc à un moment, ou sur une période donnée. Il ne vise pas un horizon de temps particulier. On peut en faire une utilisation en prospective si on lui fournit des rythmes de rénovation et de construction, mais il ne modélise que le parc existant, via la BNDN, et ne constitue pas en soi un modèle dynamique de parc.
Pas temporel		

	<p>sur un pas de temps particulier, autre que celui sur lequel ce périmètre d'opérations est considéré pour lui fournir des données d'entrée.</p>
Principes de calcul	<p>Le modèle fonctionne selon l'enchaînement de cinq étapes principales :</p> <ul style="list-style-type: none"> • le traitement des données et la génération d'échantillons: bien que la BDNB rassemble de très nombreuses informations, tous les bâtiments ne sont pas caractérisés avec le même niveau de qualité d'information, et celle-ci n'est pas toujours suffisante pour fournir les informations clés nécessaires au module TyPy telles que l'usage du bâtiment ou sa date de construction. Ainsi, seuls les bâtiments pour lesquels ces informations clés sont fournies sont considérés: par exemple, pour le secteur résidentiel, seuls les bâtiments disposant d'un Diagnostic de performance énergétique(DPE) sont pris en compte, pour bénéficier des informations sur les matériaux d'isolation ou la structure que fournit le DPE. En revanche; le non-résidentiel ne disposant pas de DPE, tout bâtiment auquel des données géospatiales et la date de construction sont fournies peut être pris en compte; • l'enrichissement des données: chaque bâtiment considéré est modélisé comme un ensemble de composants et d'assemblages ou macro-composants, grâce au module TyPy. Le stock de bâtiments est pour cela décomposé par usage, date de construction, et caractérisation des matériaux utilisés dans les principaux éléments, tels que les murs extérieurs et le toit. La base de données associe à chaque macro-composant des caractéristiques telles que sa densité ou sa conductivité thermique; • la modélisation elle-même : les quantités de matériaux associées à chaque bâtiment peuvent alors être déterminées en croisant les caractéristiques des macro-composants avec les données fournies par le module de calcul géométrique, telles que l'estimation de la surface de l'enveloppe du bâtiment, ou de sa surface de plancher en fonction du nombre d'étages. Ces données géométriques permettent de calculer la masse de chaque composant du bâtiment, donc la répartition par catégorie selon les caractéristiques de chaque macro-composant; • l'évaluation des flux : dès lors que la quantité de matériaux en jeu peut être modélisée pour chaque bâtiment composant l'échantillon, les flux de matières et de déchets générés peuvent être estimés en fonction de quels bâtiments sont détruits ou rénovés. Le modèle intègre pour cela un paramétrage des taux de démolition et de rénovation pour les différentes catégories de bâtiments, en fonction de leur période de construction et de leur usage notamment; • l'extrapolation: il s'agit pour finir de transposer les résultats obtenus sur l'échantillon de bâtiments considérés à l'échelle de l'ensemble du territoire couvert, ce qui est statistiquement possible dès lors que l'échantillon est suffisamment varié par rapport à la « population » de bâtiments. Il faut pour cela disposer à minima d'un échantillon d'environ 1500 bâtiments. L'extrapolation repose naturellement sur un calcul de la représentativité statistique de chaque bâtiment de l'échantillon, celle-ci s'appuyant sur un rapport de surface entre l'échantillon et l'ensemble des bâtiments pour chaque catégorie de période de construction, d'usage et de structure.
Entrées	<p>Le modèle intègre les données d'un très large panel de bâtiments, s'appuyant sur la BDNB. Celle-ci fournit notamment, outre les données sur l'usage et la date de construction, des informations sur la géométrie des bâtiments et une partie des matériaux mis en jeu, ces informations étant complétées par le calcul dans le module TyPy et le module sur la géométrie.</p> <p>Des hypothèses d'évolution des matériaux utilisés peuvent être injectées dans TyPy et ainsi être prises en compte en entrée exogène.</p> <p>Les rythmes de construction et de rénovation sont également des données exogènes. Pour le secteur résidentiel, le modèle est plutôt calibré sur la possibilité de rénover ou de démolir pour les bâtiments construits entre 1945 et 1970, considérés comme présentant le plus de pathologies thermiques, quand les bâtiments construits avant 1945, plus adaptés et adaptables, sont principalement rénovés, et que les bâtiments construits entre 1970 et 1995 sont aussi soumis à des rénovations pour s'adapter à l'évolution de la réglementation sur la performance des bâtiments. Pour le non-résidentiel, le modèle ne pré-conditionne pas le niveau respectif de rénovation et de démolition.</p> <p>De la même manière, des hypothèses de sobriété sur les surfaces pourraient être intégrées de façon exogène.</p>
Sorties	<p>Le résultat de la modélisation est le calcul du flux de matériaux et de déchets associé aux opérations de démolition, de rénovation et le cas échéant de nouvelles constructions (moyennant une caractérisation des bâtiments concernés) sur le parc bâti du territoire. Ces matériaux et déchets sont quantifiés par catégorie à l'échelle des macro-composants mis en jeu dans les bâtiments, des bâtiments de chaque type, et du territoire.</p> <p>L'outil permet de modéliser également des éléments de coût de traitement des déchets.</p>
Éléments de discussion	
Points forts	<p>La principale force du modèle est sa connexion à la BDNB, riche de plus de 21 millions de bâtiments résidentiels ou tertiaires, qui permet une meilleure caractérisation des bâtiments et une bonne connaissance du parc pour l'échantillonnage et sa pondération. Elle est au cœur de l'approche mixte, entre modélisation « bottom-up » par archétypes et modélisation « au bâtiment » qui fait l'originalité de BTPFlux.</p> <p>Appliqué à l'échelle d'un territoire, le modèle permet notamment, grâce à son niveau de détail et à sa flexibilité en termes de configuration, de s'ajuster aux spécificités urbaines. Il peut également intégrer des schémas spécifiques de démolition et de rénovation, et comparer les flux résultants avec les capacités de réutilisation dans des schémas d'économie circulaire à l'échelle du territoire. La même logique peut être appliquée au potentiel de mutualisation entre territoires voisins lorsque la modélisation peut être appliquée à plusieurs d'entre eux.</p>
Questionnements et développements	<p>La caractérisation des matériaux mis en jeu repose en partie sur les informations issues de la BDNB, mais en partie aussi des compléments apportés par la typologie développée dans TyPy.</p> <p>Pour la rénovation, la question des matériaux et de leur relation au niveau de performance atteint est assez centrale. L'outil s'appuie sur une base de données sur la rénovation basée sur l'étude ADEME en prospective et complétée par l'expertise CSTB, avec la volonté de parvenir à une vision complète des impacts d'une rénovation, au-delà des seuls composants contribuant directement à la performance énergétique (par exemple, il s'agit de modéliser aussi le bardage et pas uniquement l'isolant dans une ITE, ou de décrire spécifiquement les rénovations de pièces humides et les gestes induits).</p> <p>Dans une vision prospective, différentes questions peuvent également se poser sur l'évolution de certains paramètres, comme l'évolution du contenu en carbone des différents matériaux, vue notamment par les industriels.</p>
Données	—

Besoins identifiés	Méthode	—
Positionnement dans la cartographie		
 Outils et modèles	<p>Le modèle BTPFlux est un outil de diagnostic des consommations de matériaux et des flux de déchets à l'échelle du parc de bâtiments d'un territoire, sans visée normative ou prospective. Il couvre l'ensemble du territoire métropolitain mais s'applique plutôt, pour des raisons d'opérabilité du calcul, à l'échelle de territoires plus restreints.</p>	
 Champs et paramètres	<p>Les deux dimensions principales sur lesquelles opère le modèle sont celles des bâtiments et celle des ressources. Sur la première, le modèle procède en combinant deux unités fonctionnelles: celle du bâtiment lui-même, individualisé, et celle du cluster, ou de l'archétype, représentant une catégorie de bâtiments à l'intérieur du parc. Sur la seconde, le modèle traite principalement des quantités de matériaux et de déchets mis en jeu. La démarche de modélisation peut conduire à toucher d'autres dimensions, telles que celle des sols autour de la géométrie des bâtiments ou celle de l'économie autour des coûts de traitement des déchets, mais de façon très secondaire.</p>	
 Chainages et bouclages	<p>Cette dimension n'a pas été explorée. Le modèle BTPFlux fait partie d'une suite d'outils développés par le CSTB et s'inscrit de fait dans une démarche de modélisation globale de différents enjeux associés au bâtiment (les composants Typy sont notamment décrits par une donnée environnementale donc «chainables» avec un calcul ACV). Si son caractère très descriptif et son mode de calcul se prêtent assez bien à des démarches d'interfaçage avec d'autres outils, le niveau détaillé d'information auquel il travaille et l'articulation de ses données avec celles de la BDNB constituent à l'inverse des limitations importantes à l'interfaçage avec des outils travaillant à un niveau plus agrégé.</p>	
 Questions et enjeux	<p>Bien qu'il n'ait pas une vocation prospective, et qu'il soit limité dans ce domaine dans la mesure où son fonctionnement est adossé à la caractérisation et à l'évaluation du parc de bâtiments existant, cet outil aborde différentes problématiques proches des questionnements identifiés. Cela concerne bien sûr essentiellement la dimension technique, avec des évaluations très directement connectées par exemple à l'analyse en cycle de vie. Au-delà de cet enjeu, le modèle s'approche par sa méthode de la question de l'empreinte écologique, et pourrait probablement par exemple traiter davantage de la problématique d'artificialisation des sols. Dans un autre registre, la capacité du modèle à travailler à différentes échelles se prête sans doute à éclairer sous l'angle de la trajectoire matériaux et déchets, dans la dimension territoriale, des enjeux de différenciation par territoire ou d'articulation du local au national.</p>	

A20. Décarbo-CSTB (CSTB)

Outil		
Modèle / outil	Décarbo-CSTB (nom provisoire)	<i>Cette modélisation vise, pour éclairer les stratégies de décarbonation du parc de bâtiments, à modéliser ses émissions de gaz à effet de serre et leur évolution, au périmètre de l'usage, de la construction et de la rénovation.</i>
Porteur(s)	CSTB	
Développeur(s)	CSTB	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Jérémie EL BEZE Direction économie et ressource - CSTB Mathilde LOUÉRAT Cheffe de projet Atténuation du réchauffement climatique - CSTB	jeremy.elbeze@cstb.fr mathilde.louerat@cstb.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 16/03/2023. Fiche validée le 01/08/2024.	
Ressources	Article scientifique : https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2600/15/152010/pdf	
Modèle général		
Finalité	La démarche portée par cet outil vise à la modélisation de l'impact carbone en cycle de vie du secteur du bâtiment et à la quantification, en cycle de vie également, de leviers de décarbonation.	
Type d'outil	L'objectif de l'outil est de combiner une modélisation de type diagnostic sur le contenu en carbone du parc de bâtiments et de son utilisation avec la capacité à projeter l'impact de stratégies visant à la décarbonation.	
Champ de modélisation	L'outil porte sur l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre associées à la vie du parc de bâtiments, tant du point de vue de leur cycle de vie incluant leur construction, leur éventuelle rénovation et leur démolition, que du point de vue de la consommation d'énergie générée par leur usage.	
Usage type / périodicité	Le développement de ce modèle s'inscrit notamment dans la nécessité, conformément à loi n°2021-1104, d'élaborer une feuille de route sectorielle pour la décarbonation du secteur du bâtiment, au titre de grand secteur émetteur.	
Architecture	<p>L'outil n'est pas stabilisé. Les travaux en cours combinent une approche top-down et une approche bottom-up.</p> <p>L'approche top-down, basée sur la thèse de Marin PELLAN, s'appuie sur la base de données Exiobase pour estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur du bâtiment en cycle de vie et en empreinte, c'est-à-dire en distinguant la part territoriale et la part liée au solde entre exportations et importations. Les émissions du scope 1 et 2 sont basées sur les données du CEREN, et les émissions du scope 3 sont tirées des données d'Exiobase.</p> <p>L'approche bottom-up s'appuie sur une démarche de modélisation conforme à celle développée pour BTPFlux. Elle utilise la Base de données nationale bâtiment (BDNB) pour modéliser à partir des données bâtiment les consommations d'énergie, grâce au modèle COMETH de simulation dynamique des performances thermiques et énergétiques des bâtiments, ou sur la base du Diagnostic de performance énergétique (DPE), pour le scope 1 et 2; pour le scope 3, un calcul environnemental en analyse cycle de vie (ACV) est mené, en complétant les données de la BDNB sur la géométrie des bâtiments et sur la matérialité par l'outil TyPy.</p> <p>L'approche bottom-up vise également à permettre de qualifier des gisements de réduction des émissions de GES grâce à la modélisation de certains leviers de décarbonation, par exemple la décarbonation de filières industrielles.</p>	
Rythme d'actualisation	Le développement de cet outil reste en cours, donc à ce stade il n'y a rien de figé qu'il faudrait songer à « actualiser », et le périmètre comme le rythme d'utilisation restent ouverts.	
Périmètre technique	Bâtiments	Comme pour l'outil BTPFlux , cette modélisation s'appuie sur la BDNB, qui vise à couvrir tout le parc. En pratique le secteur résidentiel est mieux connu et caractérisé dans cette base. A priori les résidences secondaires sont incluses, mais pas identifiées comme telles dans l'outil, ce qui ne permet pas un calcul énergétique différencié à ce stade.
		Pour le non-résidentiel, les bâtiments de bureaux et du secteur de l'enseignement sont également bien renseignés, mais les autres branches du secteur tertiaire sont moins bien documentées à ce stade.
	Usages	L'outil vise à couvrir deux dimensions d'usage des bâtiments. La première concerne, pour le calcul aux scopes 1 et 2, les consommations d'énergie associées à l'utilisation des bâtiments. Le modèle combine un calcul pour le chauffage, sur la base du DPE avec un calcul de type 3CL ou de la simulation COMETH (selon la taille du parc à traiter/le niveau de précision recherché), et une consommation normalisée au périmètre des cinq usages du DPE actuel. La seconde (selon la même approche que BTPFlux), pour le calcul au scope 3, porte sur les actions relatives à la gestion du stock de bâtiments, qu'il s'agisse de construction, démolition ou rénovation.
	Population	Comme pour l'outil BTPFlux , l'approche de modélisation se concentre sur les bâtiments et leur fonction, sans considérer la population concernée.
Périmètre géograph.	Échelle	Par son approche de modélisation, l'outil provisoirement nommé Décarbo-CSTB se prête à une application à différentes échelles territoriales, sachant qu'il utilise toutefois s'agissant de nombreux paramètres des données moyennées à l'échelle nationale.
	Territoire	L'outil est au périmètre de la BDNB, qui couvre la France métropolitaine, y compris la Corse.
Périmètre temporel	Horizon	L'horizon de temps du modèle, pour sa partie prospective, n'est pas fixé a priori et dépend en fait des données d'entrée que l'on se donne. Il permet de projeter des calculs sur le nombre d'années que l'on souhaite, en faisant varier le nombre de constructions de de rénovations au fil du temps, jusqu'au pas annuel.
		L'outil est a priori calibré pour produire des « photographies » en trois instants, avec un point de calage à 2019 et des échéances à 2030 et 2050 en fonction des hypothèses sur l'évolution de l'état du parc. Mais il peut en réalité fournir des résultats selon la fréquence fixée par les données d'entrée.

Pas temporel	Le modèle est conçu pour fournir une « photographie » des émissions en usage et en analyse cycle de vie dans une situation fixée, et permet de faire varier ce résultat en fonction d'évolutions de la situation au pas de son choix, jusqu'au pas annuel.				
Principes de calcul	<p>Pour cet outil, l'enjeu de la modélisation est de créer une connexion entre la BDNB et un cœur de calcul énergie-carbone.</p> <p>Pour les bâtiments existants, les bâtiments sont décrits à partir de la BDNB puis l'information est enrichie pour préciser et compléter les caractéristiques énergétiques et matérielles, en lien notamment avec des données environnementales via la base de données de composants, macro-composants et archéotypes de bâtiment TyPy, utilisée dans BTPFLux.</p> <p>Pour la rénovation, des packages de rénovation sont appliqués aux bâtiments. Ils sont également décrits en termes de performance énergétique et d'ACV, ce qui permet ensuite de lancer des simulations énergie et ACV pour obtenir le gain de consommation d'énergie ainsi que l'investissement et le gain carbone en cycle de vie de la rénovation.</p> <p>Pour le neuf, l'outil s'appuie sur la modélisation des archéotypes de bâtiments et permet de modéliser des leviers de décarbonation telles que les progrès de décarbonation de certaines filières, et l'évolution des parts entre modes constructifs (béton et matériaux biosourcés...). Des approches simplifiées par ratio, par exemple calées sur les seuils carbone de la RE2020, sont également possibles.</p> <p>Des scénarios de flux de construction et de rénovation, avec des hypothèses sur les modes constructifs ou de rénovation, peuvent ainsi être évalués.</p>				
Entrées	<p>Le modèle s'appuie d'abord sur l'ensemble des données relatives au stock de bâtiments issues de la BDNB, complétées par les données embarquées notamment dans le module TyPy.</p> <p>L'outil a besoin également d'hypothèses quantitatives et qualitatives de construction et de rénovation, et peut sur ce point être connecté avec le modèle ZEPHYR.</p> <p>La modélisation énergétique s'appuie essentiellement sur la quantification de la performance énergétique, mais elle peut également intégrer des hypothèses de sobriété, relatives en particulier aux températures de consigne. De même des hypothèses de sobriété sur les surfaces peuvent être intégrées de façon exogène.</p> <p>Des hypothèses d'évolution des matériaux utilisés peuvent aussi être injectées dans TyPy et ainsi être prises en compte en entrée exogène. Le module permet donc de simuler la décarbonation de certaines filières de production industrielles et des solutions bas-carbone : des données exogènes issues de la feuille de route d'engagement des filières peuvent être injectées dans l'outil. Par exemple, l'outil a été utilisé pour la Feuille de route décarbonation : il a permis de simuler l'écart entre le tendanciel et les meilleures pratiques de décarbonation des matériaux, ou encore prolongation du durcissement des exigences de la RE2020.</p>				
Sorties	<p>L'outil produit essentiellement une évaluation en énergie et en carbone des bâtiments, couvrant les consommations d'énergie liées à leur usage et le contenu en carbone de leur construction ou rénovation, couvrant les émissions des scopes 1 à 3.</p> <p>L'outil peut produire des sorties agrégées ou fournir des sorties détaillées, en séparant le neuf et la rénovation, les émissions par scope, par lot, par typologie de bâtiment ou encore par étiquette DPE.</p>				
Éléments de discussion					
Points forts	La principale force du modèle est sa connexion à la BDNB, riche de plus de 21 millions de bâtiments résidentiels ou tertiaires, qui permet une meilleure caractérisation des bâtiments et une bonne connaissance du parc pour l'échantillonnage et sa pondération.				
Questionnements et développements	Dans une vision prospective, différentes questions peuvent se poser sur l'évolution de certains paramètres, comme l'évolution du contenu en carbone des différents matériaux, vue notamment par les industriels. Dans le même registre, il conviendrait également d'intégrer l'évolution du contenu carbone de l'électricité et du gaz.				
Besoins identifiés	<table border="1"> <tr> <td>Données</td><td>—</td></tr> <tr> <td>Méthode</td><td>—</td></tr> </table>	Données	—	Méthode	—
Données	—				
Méthode	—				
Positionnement dans la cartographie					
 Outils et modèles	La démarche Décarbo-CSTB porte sur une modélisation exploratoire, à visée normative, de la décarbonation du secteur du bâtiment, à l'échelle nationale ou infra, aux horizons de temps souhaités, du point de vue de l'amélioration des performances énergétiques par la rénovation comme du contenu carbone en analyse cycle de vie des matériaux utilisés en construction et en rénovation.				
 Champs et paramètres	Le modèle traite essentiellement deux dimensions, qui sont celles des bâtiments , avec leurs composants constructifs, et celle des ressources (énergie) . Concernant la première, il utilise à la fois l'unité fonctionnelle du bâtiment, qui est celle de la BDNB, et celle de l'archéotype représentatif d'une catégorie de bâtiments, tel que développé dans TyPy. Pour la seconde, il mobilise à la fois des unités relatives à l'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre, à chaque fois sous l'angle des unités de comptage mises en jeu.				
 Chaînages et bouclages	Dans la démarche globale de modélisation développée par le CSTB, l'outil Décarbo-CSTB peut s'articuler avec d'autres outils. En particulier, il s'appuie sur des éléments partagés avec le modèle BTPFLux (la base BDNB, le module TyPy et le module géométrique). Il peut également être chaîné avec d'autres outils pour lui fournir par exemple certaines des données exogènes dont il a besoin, par exemple avec ZEPHYR sur les hypothèses de construction ou de rénovation.				
 Questions et enjeux	Au regard de son périmètre, cet outil aborde différentes problématiques proches des questionnements identifiés. Cela concerne pour l'essentiel la dimension technique , avec une méthode d'évaluation explicitement liée à une analyse en cycle de vie, et une capacité de caractérisation, sur une partie de son périmètre au moins, de l'empreinte en émissions de gaz à effet de serre des bâtiments. Le modèle s'approche plus largement par sa méthode de la question de l'empreinte écologique, et pourrait peut-être traiter d'autres aspects constitutifs de cette empreinte. Il semble en revanche peu apte à s'ouvrir à d'autres enjeux parmi ceux que cette étude met en évidence.				

A21. MENFIS (CSTB / ADEME)

Outil		
Modèle / outil	MENFIS	<i>Cet outil propose une simulation du taux de rénovation décidé par les ménages et les bailleurs sociaux en fonction des politiques et mesures mises en place, et de l'effet de ces rénovations sur la consommation d'énergie pour le chauffage des logements.</i>
Porteur(s)	CSTB	
Développeur(s)	ADEME et CSTB	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Jérémie EL BEZE Direction économie et ressource – CSTB Henri CASELLA Économiste, Analyse économique et dynamique du parc, Direction Economie et Ressources Mathilde LOUÉRAT Cheffe de projet Atténuation du réchauffement climatique - CSTB	jeremy.elbeze@cstb.fr Henri.CASELLA@cstb.fr mathilde.louerat@cstb.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 16/03/2023. Fiche validée le 09/09/2024.	
Ressources	Thèse : https://hal.science/tel-01618117v1/file/Nauleau%20th%C3%A8se%20soutenue%2018%2006%202015.pdf Abstract : https://www.iaee.org/en/publications/proceedingsabstractpdf.aspx?id=6452	
Modèle général		
Finalité	Le Modèle ÉNergie et FIScalité (MENFIS) porte sur la projection de l'évolution de la consommation d'énergie via la modélisation de la probabilité des ménages de réaliser des travaux de rénovation sur le parc résidentiel selon les politiques publiques.	
Type d'outil	Il s'agit d'un modèle hybride énergie-économie de simulation de trajectoires de performance énergétique et de consommation de chauffage des logements, explicite sur les techniques et les comportements.	
Champ de modélisation	Ce modèle projette une évolution de la performance énergétique du parc résidentiel français à l'horizon du court-moyen terme, via la combinaison d'actions de rénovation, d'effets de vétusté, et de démolitions et constructions. Il développe des calculs technico-économiques pour déterminer les parts de logements rénovés et le niveau de performance atteint, et en déduire les niveaux de consommation d'énergie.	
Usage type / périodicité	L'outil MENFIS a été développé initialement par Gaël CALLONNEC puis Marie-Laure NAULEAU, dans le cadre d'une thèse, en partenariat avec l'ADEME. Il est actuellement porté par le CSTB. Il a été utilisé au niveau national pour les scénarios dits « avec mesures existantes » et « avec mesures supplémentaires » (AME et AMS) de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), pour des estimations du taux de recours aux nouveaux dispositifs d'aide (Efficacité et Performance) ainsi que par le CSTB pour réaliser des études pour des énergéticiens.	
Architecture	L'outil MENFIS est organisé autour d'un modèle microéconomique comportemental basé sur la maximisation de l'utilité de l'investissement en matière d'investissement dans la rénovation. Il s'appuie pour cela sur une représentation modélisée du stock de bâtiments, croisant sa caractérisation sur le plan technique et socio-économique, et sur des modules permettant d'intégrer les solutions de rénovation d'une part, et l'évolution des prix de l'énergie ainsi que le cadre des politiques publiques d'autre part. Il applique parallèlement un calcul de type 3CL pour évaluer la consommation des logements, et projette pour finir l'impact du nombre et de la performance des rénovations tels que fournis par le calcul micro-économique sur cette consommation d'énergie.	
Rythme d'actualisation	La mise à jour se fait au fil de l'eau concernant différents paramètres du modèle tels que les prix de l'énergie ou encore les conditions et les montants des aides publiques. Une calibration du rythme de rénovation est réalisée chaque année	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre le parc résidentiel, et traite uniquement des résidences principales en France Métropolitaine
	Usages	L'usage modélisé est le chauffage, dont l'évolution est mesurée en termes d'effet des prix et des politiques publiques sur le nombre et le niveau des actions de rénovation.
	Population	MENFIS concerne l'ensemble de la population, décrite sous forme de ménages, en les distinguant selon leur statut d'occupant et de propriétaire ou locataire: propriétaire occupant, propriétaire, locataire, logement social.
Périmètre géograph.	Échelle	Le modèle porte sur le parc de logements à l'échelle nationale. Dans le cadre du projet Gorenove Adéquation, une territorialisation du modèle à l'échelle départementale a été réalisée.
	Territoire	Il couvre à ce titre l'ensemble de la France métropolitaine, avec la Corse
Périmètre temporel	Horizon	L'outil peut fonctionner à l'horizon 2050, qui est notamment celui de la SNBC, mais il est plutôt conçu initialement, en lien avec la projection de politiques et mesures, pour explorer un horizon plus proche.
	Pas temporel	Il opère un calcul itératif au pas de temps annuel.
Principes de calcul	Le modèle MENFIS permet de modéliser la probabilité de réalisation de gestes ou bouquets de gestes de rénovation par les ménages selon les politiques publiques (subventions...) croisées avec des hypothèses d'évolution des prix de l'énergie. La première étape concerne la représentation socio-technique du parc de logements s'appuie sur une segmentation selon la typologie(maison individuelle et logement collectif), le vecteur énergétique principal pour le chauffage(électricité, gaz, fioul, bois...), la date de construction (avant 1948, entre 1949 et 1974, et selon les périodes d'application de la réglementation thermique), ainsi que la zone climatique. Les ménages sont représentés par taille du foyer, quintile de revenus et selon le statut de propriétaire et/ou d'occupant, en maison individuelle, copropriété ou logement social, le propriétaire étant supposé décisionnaire en dernier ressort. Chaque combinaison de ces sept variables constitue un segment, le modèle travaillant ainsi avec un total de 8 640 segments.	

<p>La deuxième étape porte sur les options de rénovation. Chaque bâtiment est pour cela décomposé en huit composants: trois pour l'enveloppe – murs, toit et fenêtres –, un pour le mode de chauffage principal, deux pour des modes supplémentaires (poêle à bois ou pompe à chaleur), un pour l'existence d'un système d'eau chaude distinct et un pour la présence de panneaux photovoltaïques. Chacun de ces composants répond dans le modèle à deux états possibles de performance, bas sans rénovation ou rénovation significative, et haut après une rénovation significative.</p> <p>Parallèlement, un troisième module fournit tous les paramètres économiques nécessaires, au pas annuel. Cela inclut les prix des énergies, les taux d'intérêt, et les instruments politiques mis en place, tels que les subventions, prêts à taux zéro, tarifs d'achat du photovoltaïque, etc.</p> <p>En quatrième étape, le cœur de l'outil est un modèle de régression calé sur les statistiques de 2008 à 2018. Il calcule une valeur actualisée nette (VAN) des travaux envisagés, ainsi que des barrières à l'investissement (eg. la difficulté plus importante de rénover en copropriété, ou la difficulté d'investir pour les ménages à faible revenu) et des paramètres spécifiques aux gestes (eg. co-bénéfice d'usage de remplacer les fenêtres ou au contraire coûts cachés). Sur cette base, l'outil modélise les décisions d'investissement des ménages dans les différentes actions de rénovation présentées, selon une fonction de probabilité de choisir chaque option pour chaque ménage dans chacun des segments.</p> <p>Ainsi, tout en tenant compte par ailleurs d'évolutions liées aux nouvelles constructions, au retrait de logements du parc sous l'effet de leur vétusté et aux démolitions, l'outil MENFIS calcule, au pas annuel, une part des logements soumis, segment par segment, aux différentes actions de rénovation énergétique considérées.</p> <p>Enfin, la dernière étape de modélisation porte sur l'évaluation de l'impact de ces rénovations sur la consommation d'énergie pour le chauffage, incluant une prise en compte de l'effet rebond, et fournit en regard de la répartition par énergie un calcul des émissions de CO₂ associées à cette consommation.</p>	
Entrées	Les données d'entrée portent sur la typologie du parc, selon les catégories techniques et socio-économiques établies, sur les hypothèses exogènes d'évolution des prix de l'énergie, et sur les politiques publiques de soutien à la rénovation.
Sorties	Sur cette base, le modèle simule les comportements et fournit une évaluation quantitative de la nature et du nombre de travaux de rénovation réalisés par les ménages, puis de son impact sur les consommations d'énergie associées au chauffage des logements, et sur les émissions de CO ₂ que ces consommations entraînent.
Éléments de discussion	
Points forts	La principale spécificité de MENFIS est de proposer un modèle prédictif des choix des ménages en matière de rénovation, avec une approche économique. Ce modèle s'appuie de plus sur une description socio-technique très fine du parc de logements.
Questionnements et développements	MENFIS est calibré sur la base de plusieurs sources statistiques. La base d'évaluation du nombre de logements, des surfaces totales de plancher et de la consommation réelle d'énergie pour chacun des segments est fournie par la base de données construite par le CEREN pour l'ADEME, qui s'appuie au départ sur l'Enquête nationale logement (ENL) menée par l'INSEE en 2006. D'autres sources, comme les résultats de l'enquête OPEN menée par l'ADEME, viennent compléter ces données, et la question de leur actualisation est importante. Par ailleurs, l'une des principales limites du modèle est qu'il ne permet pas de différencier les coûts ou la performance à terme d'une trajectoire de rénovation globale, par étapes ou par gestes.
Besoins identifiés	Les axes de travail 2025 incluent la mise à jour des données décrivant le parc et la composition des segments (basés sur l'enquête logement), celle des données de calibration (via notamment les données MaPrimeRenov et Certificats d'Economie d'Energie), et un élargissement des variables descriptives du parc (notamment pour intégrer des nouveaux usages : climatisation, réseau de chaleur urbain, etc...). Le modèle pourrait également s'améliorer en s'appuyant sur davantage de données de coûts de rénovation, permettant notamment de caractériser l'hétérogénéité des prix constatés.
Méthode	—
Positionnement dans la cartographie	
 Outils et modèles	Le modèle MENFIS est un outil de simulation technico-économique, explicite sur les caractéristiques techniques du parc de logements et les comportements de ses occupants vis-à-vis de la rénovation énergétique, destiné à fournir une aide à la décision sur l'efficience des politiques et mesures dans ce domaine. Il fournit une évaluation de leur effet à l'échelle nationale, au pas de temps annuel, et jusqu'à un horizon suffisamment qualifié par ses hypothèses de cadrage.
 Champs et paramètres	Cet outil se concentre sur la dimension du parc de bâtiments , auquel il applique essentiellement des actions de rénovation (inclus le changement de mode de chauffage), qu'il décrit sous la forme d'unités fonctionnelles appelées segments, correspondant à des catégories de logements selon sept variables relatives à leur type et aux caractéristiques de leurs propriétaires ou occupants. Il traite aussi fortement la dimension économie , au travers des prix des énergies et des différents signaux économiques encadrant les coûts directs et indirects de la rénovation. Pour faire le lien entre ces deux dimensions, il aborde celle des ressources, au sens des consommations d'énergie pour l'usage chauffage, et celle de la population, caractérisée sous forme de cohortes de ménages de différentes catégories.
 Chaînages et bouclages	La question des chaînages et bouclages n'a pas été véritablement explorée. Cet outil s'intègre dans la démarche globale de modélisation développée par le CSTB, et fournit des éléments qui participent de l'élaboration des stratégies nationales en matière d'énergie, de climat et de bâtiment. Un chainage avec le modèle macroéconomique de l'ADEME ThreeMe est prévu afin de fournir des données de calibration à ce dernier.
 Questions et enjeux	De par son périmètre volontairement spécifique, cet outil se prête assez peu à un élargissement du questionnement. Il s'intéresse toutefois à une problématique relative aux réponses des ménages aux signaux relatifs à la rénovation qui ouvre sur certains des enjeux identifiés autour des dynamiques socio-économiques, comme l'effet «rebond», dont il traite déjà, ou les questions de distribution des efforts et des bénéfices de l'action en matière de rénovation, en lien avec les enjeux de revenus comme de précarité. Au-delà de ces points particuliers, il semble plus difficile de le relier aux autres enjeux identifiés.

A22. ZEPHYR (CSTB)

Outil		
Modèle / outil	ZEPHYR	Ce modèle permet de modéliser, à l'échelle d'un parc résidentiel, l'optimisation économique des trajectoires de rénovation thermique du point de vue de la minimisation du coût global associé au chauffage.
Porteur(s)	CSTB	
Développeur(s)	CSTB	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Jérémie EL BEZE Direction économie et ressource - CSTB Mathilde LOUÉRAT Cheffe de projet Atténuation du réchauffement climatique - CSTB	jeremy.elbeze@cstb.fr mathilde.louerat@cstb.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 16/03/2023. Fiche validée le 01/08/2024.	
Ressources	Thèse : https://www.chaireeconomiedudimat.org/wp-content/uploads/2019/01/Th%C3%A8se_Jeremy_EL_BEZE_UPD.pdf	
Modèle général		
Finalité	Il s'agit d'un outil de modélisation et d'optimisation économique des trajectoires de décarbonation du secteur résidentiel.	
Type d'outil	ZEPHYR est un outil de simulation prospective dit « énergie-économie » en ce qu'il croise ces deux dimensions, basé sur une approche technico-économique et centré sur la minimisation du coût global de chauffage d'un grand nombre de logements-types, représentatifs et permettant une reconstitution dite « bottom-up » du parc résidentiel français.	
Champ de modélisation	L'approche consiste à modéliser l'ensemble des consommations d'énergie pour le chauffage d'un parc résidentiel, à calculer leur coût et à simuler la meilleure trajectoire de réduction de ce coût, en fonction d'actions de rénovation et de changement de système de chauffage.	
Usage type / périodicité	L'outil est utilisé à l'échelle nationale, à l'appui notamment de la feuille de route décarbonation du cycle de vie du bâtiment. Il peut également être utilisé à l'échelle d'un parc bâti, comme celui de bailleurs sociaux.	
Architecture	<p>Ce modèle est fondé sur une démarche « bottom-up », où les trajectoires modélisées résultent de l'agrégation des opérations projetées par hypothèse sur les bâtiments, décrits sous forme de logements-types.</p> <p>Le modèle est dans cette perspective construit autour d'un algorithme de minimisation du coût global de chauffage des logements. Celui-ci opère au pas annuel, à l'échelle de chaque logement-type puis sur plusieurs années à l'échelle du parc. Le modèle articule donc un module de caractérisation de chaque catégorie de logement-type, qui porte sur ses caractéristiques en termes de système de chauffage, d'enveloppe thermique, de forme architecturale et de localisation.</p> <p>Une modélisation énergétique permet dès lors de calculer la consommation d'énergie de chauffage de chaque logement-type, qui peut ensuite être croisée avec des hypothèses sur les variables économiques telles que les prix des énergies, et un module concernant les options d'investissement sur le mode de chauffage et l'isolation.</p> <p>L'algorithme produit alors pour chaque année n et logement-type une combinaison optimisée d'opérations, qui conduit à une optimisation de l'évolution du parc à l'année n+1. En tenant compte des durées d'amortissement des opérations, ce calcul incrémental produit une minimisation des coûts sur la période couverte.</p>	
Rythme d'actualisation	Outre les évolutions éventuelles du modèle, en vue de l'adapter aux besoins, l'outil fait l'objet d'une actualisation sur les coûts et les prix des énergies tous les ans.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle porte sur l'ensemble du parc résidentiel, mais ne couvre à travers les logements-types que sur les résidences principales.
	Usages	En termes d'usage, l'outil ZEPHYR se concentre sur la modélisation du chauffage dans le secteur résidentiel.
	Population	Le modèle traite de l'ensemble du parc résidentiel à l'échelle du territoire national ou de parcs spécifiques, et couvre donc l'ensemble des ménages concernés. Ceux-ci ne sont toutefois pas représentés explicitement dans le modèle.
Périmètre géograph.	Échelle	L'outil fonctionne selon une logique de logements-types qui permettent, par leur représentativité, de caractériser le parc à l'échelle de l'ensemble du territoire national. Il peut également s'appliquer à des parcs sur un périmètre plus spécifique.
	Territoire	ZEPHYR est calibré pour représenter le parc de l'ensemble de la France métropolitaine, avec la Corse.
Périmètre temporel	Horizon	Le modèle permet de projeter des trajectoires à l'horizon 2050, pour lequel il est actuellement calibré, mais sa structure ne présente pas d'obstacle à prolonger les trajectoires au-delà.
	Pas temporel	Le pas de temps de calcul incrémental du modèle est un pas de temps annuel.
Principes de calcul	<p>Le calcul repose en premier lieu sur la caractérisation de logements-types. Ceux-ci répondent à des catégories segmentées par année de construction, typologie(maison individuelle ou logement collectif), type d'énergie de chauffage, ancienneté du système de chauffage, qualité d'enveloppe thermique, surface et compacité, ou encore zone climatique. Le modèle ZEPHYR est ainsi basé sur 35 000 logements-types.</p> <p>Pour chacun, un calcul basé sur un modèle de type 3CL permet d'évaluer la consommation d'énergie des logements-types. Celui-ci prend en compte une forme d'effet rebond, via l'hypothèse d'une température de consigne du chauffage en moyenne plus faible dans les passerelles thermiques, et plus élevée dans les logements bien isolés. En revanche, celui-ci n'est pas relié dans le modèle au prix de l'énergie.</p> <p>Différentes options d'investissement relatives à l'isolation des différents éléments de l'enveloppe(plancher, murs, plafond, fenêtres) et au changement de système de chauffage, avec leurs caractéristiques techniques et leurs coûts, sont représentées dans le modèle. Croisées avec des hypothèses économiques sur les prix des énergies, les taux d'actualisation et les durées</p>	

		d'amortissement des investissements, elles permettent à l'algorithme de faire le calcul d'optimisation, au sens d'une minimisation du coût total d'investissement et d'usage associé au chauffage sur la période de la trajectoire.
Entrées	<p>Les données nécessaires au modèle concernent d'abord l'ensemble des caractéristiques relatives à l'élaboration de la typologie des segments de logements, aux caractéristiques de chaque segment, et à la pondération de sa représentativité par rapport au parc considéré.</p> <p>Ensuite, le modèle se nourrit d'hypothèses relatives aux prix de l'énergie et aux conditions économiques de financement et d'amortissement des investissements relatifs à la performance thermique ou au mode de chauffage des bâtiments. Dans le même registre, l'outil nécessite un jeu d'hypothèses sur les options techniques d'isolation et de mode de chauffage, et les coûts associés aux opérations correspondantes.</p>	
Sorties	<p>Le modèle fournit en sortie une description au pas annuel de la combinaison d'opérations appliquées aux différents segments du parc de logement, assorti d'un calcul de l'évolution de la consommation d'énergie correspondante. Au final, il produit sur cette base une trajectoire de minimisation globale du coût, donc d'optimisation économique de la stratégie de rénovation.</p>	
Éléments de discussion		
Points forts		<p>Le principal point fort de cet outil réside dans sa fonction spécifique, qui permet d'informer, pour un parc résidentiel donné, la trajectoire d'optimisation économique de la stratégie de rénovation.</p> <p>Sa robustesse repose par ailleurs sur le fait de construire cette modélisation sur la base d'un échantillon de 35 000 logements-types.</p>
Questionnements et développements		Concernant l'optimisation, le modèle se heurte au fait qu'il ne permet pas de différencier les coûts ou la performance à terme d'une trajectoire de rénovation basée sur des opérations de rénovation globale, ou sur des rénovations menées par étapes ou par gestes.
Besoins identifiés	Données	Les données de coûts de rénovation pourraient être améliorées, en particulier si des données disponibles permettaient de mieux caractériser l'hétérogénéité des prix.
	Méthode	Parmi les questions de méthode qui peuvent être soulevées, se pose celle d'une actualisation de la modélisation de l'effet rebond, tenant compte de l'évolution des connaissances dans ce domaine.
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	L'outil ZEPHYR est un outil de simulation prospective techniquement et économiquement explicite, qui propose en fonction d'hypothèses sur les signaux économiques (prix de l'énergie, politiques publiques) une trajectoire de minimisation du coût global associé au chauffage des logements. Il s'appuie sur une modélisation bottom-up, fondée sur un grand nombre de logements types, dont il projette l'évolution en termes de performance thermique et d'usage du parc français, au pas annuel jusqu'à un horizon 2050 ou autre.
	Champs et paramètres	Le modèle s'intéresse principalement à la dimension des usages, dans laquelle il représente la consommation d'énergie associée au chauffage des bâtiments, et à celle de l'économie, dans laquelle il représente les différents coûts associés à cet usage, c'est-à-dire les factures énergétiques des ménages et les coûts d'investissement dans la rénovation thermique ou les modes de chauffage. Pour représenter cette relation, l'outil s'appuie sur une modélisation de l'évolution du stock de bâtiments, centrée sur le résidentiel et procédant par une quantification de surfaces de logements de différents types, auxquels sont associés des caractéristiques constructives ainsi que des éléments touchant à d'autres dimensions, comme les ménages ou la compacité, donc l'empreinte au sol.
	Chaînages et bouclages	Comme pour les autres outils spécifiquement évoqués par le CSTB, ZEPHYR s'intègre dans une démarche globale de modélisation et peut intervenir dans l'élaboration de stratégies à l'échelle nationale comme à une échelle plus locale, mais la question des chaînages et bouclages dans lesquels il s'inscrit ou pourrait s'inscrire n'a pas été précisément discutée. La construction spécifique autour de logements-types sur laquelle il repose réduit probablement les capacités d'interface avec des modèles n'opérant pas selon la même logique, mais la nature désagrégée et explicite de sa description technique peut au contraire se prêter à l'interfaçage.
	Questions et enjeux	À l'inverse d'une démarche d'élargissement du questionnement, cet outil est construit pour répondre de façon opérationnelle à un questionnement précis concernant l'optimisation économique des trajectoires de rénovation des logements, en coût d'investissement et d'usage. Toutefois, la manière très désagrégée et explicite dont il modélise la relation entre le parc de bâtiments, l'évolution de leur enveloppe et leur usage pourrait se prêter à des évolutions permettant de capter d'autres enjeux. Parmi ceux-ci, sans préjuger de l'utilité de tels développements en regard d'autres options disponibles, on peut notamment identifier les questions sociales liées à la distribution des revenus et des dépenses et la précarité, les évolutions en termes d'usage, dont la sobriété sur les usages ou sur les surfaces, ou encore la différenciation territoriale et l'articulation des échelles du local au national. Il semble en revanche plus difficile de le relier aux autres enjeux identifiés.

A23. Suite de modèles sectoriels (DGEC)

Outil		
Modèle / outil	Suite de modèles sectoriels (pas de nom)	<i>Cette suite de modèles sectoriels recouvre la mobilisation intégrée de différents outils pour construire la trajectoire de consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment, dans le cadre d'une trajectoire globale de l'économie française.</i>
Porteur(s)	DGEC	
Développeur(s)	Suite d'outils propres à la DGEC et d'outils développés en externe	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Manon NAGY Chargée de mission projection SNBC et empreinte carbone - DGEC/SCEE/DLICES/EPM	manon.nagy@developpement-durable.gouv.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 21/03/2023. Fiche validée le 24/10/2024.	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	La modélisation sectorielle du bâtiment s'inscrit dans une démarche plus large, mobilisant divers outils pour établir les trajectoires de consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre à l'appui de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC).	
Type d'outil	La suite d'outils mobilisée par la DGEC vise essentiellement à une exploration de nature prospective et explicite, via une agrégation bottom-up, de l'ensemble des consommations d'énergie, et des émissions associées. Elle utilise pour cela une série d'outils sectoriels dont l'approche peut varier dans le détail, certains obéissant à une modélisation physique des usages et d'autres plutôt à une modélisation des comportements d'agents par des signaux de politiques publiques ou de prix. L'ensemble intègre également des outils d'évaluation transversale divers, comprenant par exemple des modèles d'évaluation de type entrée-sortie ou des modèles bottom-up macro-économiques.	
Champ de modélisation	La modélisation couvre, à travers l'ensemble des modèles sectoriels et des modèles d'analyse, le champ de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre de l'ensemble de l'économie française, avec ses implications en termes de matériaux ou sous certains aspects économiques. Dans le cadre de cette démarche intégrée, une partie des modèles mobilisés vise à traiter spécifiquement le secteur du bâtiment.	
Usage type / périodicité	La démarche globale dans laquelle s'inscrit cette modélisation du secteur bâtiment s'inscrit dans le cadre de l'élaboration de la SNBC, dont le rythme réglementaire de révision fixe la périodicité.	
Architecture	La démarche de construction de la SNBC mobilise une série d'outils, combinant des outils propres à la DGEC, des modèles développés par d'autres porteurs et opérés par la DGEC, parfois avec leur appui (ADEME, CIRED pour certains volets du secteur bâtiment), et l'utilisation de modèles externes (Enerdata, CITEPA...). Chaque modèle ou outil rattaché à un secteur fonctionne séparément, les agrégations de leurs résultats et interfaces étant opérés manuellement; les modèles d'analyse opérant de façon transversale utilisent les sorties de ces modèles comme input mais ne sont pas bouclés avec eux.	
Rythme d'actualisation	Le rythme d'actualisation est multiple, dans la mesure où chacun des outils utilisés, en particulier ceux qui sont développés par d'autres porteurs, a sa vie propre, mais l'activation globale de cette suite de modèles par la DGEC obéit au rythme de révision de la SNBC.	
Périmètre technique	Bâtiments	Voir modules spécifiques
	Usages	Voir modules spécifiques
	Population	L'ensemble de la population est couvert via les différents secteurs, en particulier sous la forme du nombre de personnes dans la population pour les hypothèses démographiques globales, du nombre de ménages pour les logements, et du nombre d'emplois.
Périmètre géograph.	Échelle	La suite de modèles utilisée est conçue pour s'appliquer à l'échelle nationale, sans différentiation territoriale hormis pour l'outre-mer.
	Territoire	La démarche de modélisation couvre l'ensemble du périmètre national, France métropolitaine et territoires d'outre-mer.
Périmètre temporel	Horizon	Le modèle est utilisé jusqu'à 2050, mais n'est pas intrinsèquement limité en termes de période couverte (des développements supplémentaires seraient néanmoins nécessaires).
	Pas temporel	L'ensemble des modèles sectoriels permet de calculer des bilans énergie, et d'émissions de gaz à effet de serre, à un pas de temps différent selon les modèles.
Principes de calcul	Les outils appliqués au secteur du bâtiment s'inscrivent, d'un point de vue technique, dans un ensemble constitué de nombreux modèles sectoriels voire infra-sectoriels, qui permettent d'intégrer de façon détaillée des hypothèses de politiques publiques, de prix, de contraintes techniques, etc. et qui permettent en général de projeter une consommation d'énergie par vecteurs dans chacun des secteurs concernés. Ces modèles, parfois utilisés sur une partie seulement de leur périmètre, portent sur l'agriculture (modèle MoSUT de Solagro), la forêt (calculateur forêt-bois), l'artificialisation (outil de la DGEC), le chauffage résidentiel (RES-IRF), le tertiaire (VIVALDI), la climatisation (MICO), les transports en termes de trafic (CGDD) et de parc (DGTIM), l'aviation (DGAC), la production industrielle (PepitO, puis MODEIRE), l'industrie et l'énergie (EnerMed), et les déchets (modélisation par le Citepa), etc. Ces données sont agrégées, bien que les modèles soient très différents et les éléments très disparates, pour former une chronique de bilans énergie au format du bilan du SDÉS, au périmètre de la France métropolitaine. Des compléments sont apportés pour les territoires d'outre-mer grâce à des modules spécifiques, simplifiées pour tenir compte de la moindre disponibilité de données et de l'application territoire par territoire. Ceci permet de produire des inventaires de gaz à effet de serre aux formats reconnus (UNFCCC et SECTEN-1 et 2), aux périmètres métropole, outre-mer, Kyoto et France entière. D'autres modèles de cette suite, parfois en cours de développement, permettent de nombreuses analyses complémentaires, notamment sur l'optimisation économique (TiTAN) le chiffrage des investissements (avec 14CE), la cohérence du bilan matières (MatMat), une évaluation en empreinte, des évaluations macro-économiques (avec Three-ME et Imaclim-R), socio-économiques (Prometheus), etc.	

<p>L'itération entre les modèles, pour veiller à la cohérence intersectorielle, est assurée par des bouclages spécifiques, dont un consacré à la biomasse, et par correction au vu du résultat agrégé, en tenant compte également d'une cohérence, en dehors de ces modèles de consommation, avec les projections sur la production d'énergie. Cette approche reste bottom-up et n'intègre pas de fonctionnalité de répartition optimale entre secteurs, par exemple.</p> <p>La modélisation est donc pilotée par la contrainte d'un bouclage en énergie et par les objectifs en émissions de gaz à effet de serre. La modélisation du secteur du bâtiment, déclinée ci-dessous, est abordée comme un ensemble, qui combine des outils spécifiques au résidentiel et au tertiaire respectivement pour le chauffage, et des outils couvrant l'ensemble du parc bâti pour d'autres usages.</p>							
Entrées	L'ensemble des outils est alimenté d'hypothèses de cadrage macroéconomique, notamment sur les prix des énergies, et démographique. Outre ces hypothèses communes, que les différents modèles intègrent plus ou moins et de façon plus ou moins directe, chacun des outils a ses propres données d'entrée, précisées ci-dessous pour les modèles intervenant dans la modélisation du secteur du bâtiment.						
Sorties	La principale sortie de cette modélisation est la courbe de consommation d'énergie de l'ensemble de l'économie française, détaillée par secteur et par vecteur énergétique. Celle-ci est déclinée en sortie sur les émissions de gaz à effet de serre, au même périmètre. Les modèles d'analyse transversale fournissent d'autres sorties relatives aux matières premières, aux polluants atmosphériques, comme des sorties sur les besoins d'investissement ou les impacts macro-économiques.						
Détail							
Module spécifique	Modélisation du résidentiel						
Périmètre technique	<table border="0"> <tr> <td>Bâtiments</td><td>Les modèles utilisés couvrent globalement l'ensemble du parc résidentiel, un module spécifique traitant des résidences secondaires et logements vacants.</td></tr> <tr> <td>Usages</td><td>L'ensemble des usages est traité, via différents modèles, avec plus de détail sur le chauffage et la climatisation, et un traitement plus agrégé sur les autres usages(eau chaude sanitaire, cuisson, électricité spécifique).</td></tr> <tr> <td>Population</td><td>La population est prise en compte dans la modélisation sous forme de ménages occupant différentes catégories de logements.</td></tr> </table>	Bâtiments	Les modèles utilisés couvrent globalement l'ensemble du parc résidentiel, un module spécifique traitant des résidences secondaires et logements vacants.	Usages	L'ensemble des usages est traité, via différents modèles, avec plus de détail sur le chauffage et la climatisation, et un traitement plus agrégé sur les autres usages(eau chaude sanitaire, cuisson, électricité spécifique).	Population	La population est prise en compte dans la modélisation sous forme de ménages occupant différentes catégories de logements.
Bâtiments	Les modèles utilisés couvrent globalement l'ensemble du parc résidentiel, un module spécifique traitant des résidences secondaires et logements vacants.						
Usages	L'ensemble des usages est traité, via différents modèles, avec plus de détail sur le chauffage et la climatisation, et un traitement plus agrégé sur les autres usages(eau chaude sanitaire, cuisson, électricité spécifique).						
Population	La population est prise en compte dans la modélisation sous forme de ménages occupant différentes catégories de logements.						
Périmètre géograph.	<table border="0"> <tr> <td>Échelle</td><td>Voir modèle général</td></tr> <tr> <td>Territoire</td><td>Voir modèle général</td></tr> </table>	Échelle	Voir modèle général	Territoire	Voir modèle général		
Échelle	Voir modèle général						
Territoire	Voir modèle général						
Périmètre temporel	<table border="0"> <tr> <td>Horizon</td><td>Voir modèle général</td></tr> <tr> <td>Pas temporel</td><td>Voir modèle général</td></tr> </table>	Horizon	Voir modèle général	Pas temporel	Voir modèle général		
Horizon	Voir modèle général						
Pas temporel	Voir modèle général						
Principes de calcul	<p>La première étape est la définition du parc de bâtiments. Pour le résidentiel, elle est basée sur l'entrée du modèle Antonio, qui permet notamment de déterminer un rythme de construction neuve à partir d'hypothèses sur l'usage des logements et les logements vacants, la taille des ménages, etc. La modélisation intègre également, à cette étape, un module sur les réhabilitations de bureaux en logements. L'évolution de la taille des ménages est également prise en compte en tenant compte notamment du vieillissement, le tout dans le cadre des scénarios de l'INSEE.</p> <p>Une fois défini le parc, la modélisation des consommations d'énergie repose sur la combinaison de plusieurs outils :</p> <ul style="list-style-type: none"> • le principal volet est celui qui s'applique à la consommation de chauffage des résidences principales, construite avec le modèle Res-IRF, calibré par des hypothèses sur les prix des énergies, les politiques publiques, etc. ; • les autres usages, toujours dans les résidences principales, sont calculés avec un outil de la DGEC commun au résidentiel et au tertiaire, qui couvre toutes les consommations hors chauffage et climatisation, et s'appuie outre les hypothèses démographiques sur des hypothèses sur le mix énergétique, les taux d'équipement, etc. Ce modèle traite donc l'électricité spécifique, l'eau chaude sanitaire(ECS), la cuisson, avec des hypothèses relativement agrégées ; • la consommation pour la climatisation est calculée avec MICO, calibré par des hypothèses sur les températures de consigne et la performance du parc, notamment ; • enfin, la consommation totale associée aux résidences secondaires et aux logements vacants est obtenue via un modèle dédié fourni par l'ADEME. <p>Pour chaque hypothèse, ou dans chaque modèle, les évolutions de la consommation sont croisées, via des hypothèses sur les équipements et leur évolution, avec leur répartition selon les vecteurs énergétiques(en tout, sept vecteurs sont pris en compte dans le modèle). L'ensemble de ces consommations d'énergie, désaggrégié par vecteur, est remonté en une consommation totale du secteur résidentiel sur le territoire métropolitain. La consommation du même secteur dans les territoires d'outre-mer est obtenue par l'application à chaque territoire d'un module spécifique, et agrégée à la consommation métropolitaine pour fournir l'image de la consommation nationale. En dernière étape, un rebasage sur la dernière année historique documentée par le SDES est effectué, pour bien calibrer les projections.</p> <p>Cette trajectoire en consommation d'énergie est par ailleurs soumise, au sein de la trajectoire globale, à l'ensemble des modèles d'analyse complémentaires, permettant par exemple d'obtenir, en premier lieu, la contribution du secteur résidentiel aux émissions de gaz à effet de serre, mais aussi ses besoins en investissement, pour la rénovation thermique notamment, son contenu en matériaux, etc.</p>						
Entrées	<p>Le calcul s'appuie sur une quantification des surfaces, modélisée à travers une projection du parc de logements à partir d'hypothèses démographiques et de données de caractérisation du parc existant. Sur la base de cette projection, qui intègre également une donnée produite par un module sur le transfert de surfaces du tertiaire vers le résidentiel, plusieurs modèles calculent les consommations d'énergie associées aux différents usages, avec des données qui leur sont propres. Celles-ci portent sur la caractérisation des systèmes et des équipements(performance thermique des bâtiments, performance et type de chauffage, vecteurs énergétiques utilisés, taux d'équipement et efficacité des appareils, etc.) et, pour certains cas, sur des hypothèses relatives aux usages(température de consigne en climatisation), ou relatives aux signaux auxquels répondent les ménages, pour le chauffage(prix des énergies, politiques publiques...).</p> <p>D'autres données associées aux premières interviennent ensuite, dans la suite de modèle, pour calculer la contribution du secteur résidentiel, au sein du secteur du bâtiment, dans la quantification globale. Il peut s'agir de facteurs d'émission, de contenu en matériaux, de coûts d'investissement, etc.</p>						

Sorties	<p>La finalité première de la suite de modélisation du bâtiment est de fournir la trajectoire de consommation d'énergie de ce secteur. Celle-ci est fournie pour le résidentiel et le tertiaire, avec dans le premier cas une décomposition par segment du parc, par usage et par vecteur énergétique. Ce résultat permet à son tour d'obtenir la traduction de cette trajectoire de consommation, avec la même décomposition, en termes de gaz à effet de serre. D'autres modèles permettent, moyennant l'introduction des hypothèses nécessaires, de caractériser également la contribution du résidentiel aux projections sur le volet économique (investissements, emplois...) ou environnemental (empreinte matériau...).</p>	
Détail		
Module spécifique	Modélisation du tertiaire	
Périmètre technique	Bâtiments	L'ensemble du parc tertiaire est couvert, au sens des branches couvertes par les descriptions statistiques disponibles, notamment auprès du CEREN.
	Usages	L'ensemble des usages est traité, via différents modèles, avec plus de détail sur le chauffage et la climatisation, et un traitement plus agrégé sur les autres usages (eau chaude sanitaire, cuisson, électricité spécifique).
	Population	La population est prise en compte dans la modélisation en termes d'emplois dans les différentes branches du secteur tertiaire.
Périmètre géograph.	Échelle	Voir modèle général
	Territoire	Voir modèle général
Périmètre temporel	Horizon	Voir modèle général
	Pas temporel	Voir modèle général
Principes de calcul	<p>Comme pour le résidentiel, la première étape est la définition du parc. Elle est calculée par la DGEC en fonction d'hypothèses sur les emplois par secteur et sur le nombre de m² dévolu par emploi par branche (inclus le cas échéant des hypothèses sur le télétravail), pour aboutir à des besoins en construction neuve.</p> <p>Une fois défini le parc, la modélisation des consommations d'énergie repose sur la combinaison de plusieurs outils :</p> <ul style="list-style-type: none"> comme pour le résidentiel, le volet principal porte sur la consommation de chauffage du tertiaire, construite avec le modèle Vivaldi, calibré par des hypothèses la mise en œuvre du Dispositif Eco-Energie Tertiaire. (l'introduction de ce modèle est récente : il remplace de façon plus facilement interprétable le modèle tertiaire du CGDD, que la DGEC avait plus de difficultés à intégrer de façon cohérente); les autres usages, sont calculés avec le même outil de la DGEC que pour le résidentiel, couvrant toutes les consommations hors chauffage et climatisation, et s'appuie outre les hypothèses démographiques sur des hypothèses sur le mix énergétique, les taux d'équipement, etc. Outre les mêmes usages que pour son volet résidentiel (électricité spécifique, eau chaude sanitaire, cuisson...), cet outil intègre pour le tertiaire toutes les consommations non couvertes par les données du CEREN : l'éclairage urbain, les data centers, etc. Pour ces usages, la DGEC applique des hypothèses simplifiées pour construire une courbe de consommation indexée à l'évolution de la population mais pondérée d'hypothèses de sobriété et d'efficacité; la consommation pour la climatisation est calculée comme pour le résidentiel avec MICO, calibré par des hypothèses sur les températures de consigne et la performance du parc (type et efficacité des équipements de climatisation, et rythme de diffusion), notamment, et tenant compte des besoins différenciés par zone climatique. <p>Comme pour le résidentiel, l'ensemble de ces consommations d'énergie, désagrégé par vecteur (avec une décomposition en sept vecteurs), est remonté en une consommation totale du secteur tertiaire sur le territoire métropolitain. La consommation du même secteur dans les territoires d'outre-mer est obtenue par l'application à chaque territoire d'un module spécifique, et agrégée à la consommation métropolitaine pour fournir l'image de la consommation nationale. En dernière étape, un rebassage sur la dernière année historique documentée par le SDES est effectué, pour bien calibrer les projections. De même, cette trajectoire en consommation d'énergie est par ailleurs soumise, au sein de la trajectoire globale, à l'ensemble des modèles d'analyse complémentaires, permettant par exemple d'obtenir, en premier lieu, la contribution du secteur résidentiel aux émissions de gaz à effet de serre, mais aussi ses besoins en investissement, pour la rénovation thermique notamment, son contenu en matériaux, etc.</p>	
Entrées	<p>Le calcul s'appuie sur une quantification des surfaces, déclinée par branche tertiaire. Elle est obtenue au départ par simple division du nombre d'emplois et de la surface occupée par chaque branche, cet indicateur de m² par emploi par branche pouvant ensuite bouger pour construire les trajectoires.</p> <p>Sur la base de cette projection, plusieurs modèles calculent les consommations d'énergie associées aux différents usages, avec des données qui leur sont propres. Celles-ci portent sur la caractérisation des systèmes et des équipements (performance thermique des bâtiments, performance et type de chauffage, vecteurs énergétiques utilisés, taux d'équipement et efficacité des appareils, etc.) et, pour certains cas, sur des hypothèses relatives aux usages (température de consigne en climatisation), ou relatives aux signaux auxquels répondent les ménages, pour le chauffage (prix des énergies, politiques publiques...). La modélisation intègre une calibration de l'évolution du tertiaire en termes de pourcentage d'atteinte ou de non atteinte des objectifs de performance du décret tertiaire, déclinée par branche et par horizon de temps.</p> <p>D'autres données associées aux premières interviennent ensuite, dans la suite de modèle, pour calculer la contribution du secteur résidentiel, au sein du secteur du bâtiment, dans la quantification globale. Il peut s'agir de facteurs d'émission, de contenu en matériaux, de coûts d'investissement, etc.</p>	
Sorties	<p>La finalité première de la suite de modélisation du bâtiment est de fournir la trajectoire de consommation d'énergie de ce secteur. Celle-ci est fournie pour le résidentiel et le tertiaire, avec dans le second cas une décomposition par branche tertiaire, par usage et par vecteur énergétique. Ce résultat permet à son tour d'obtenir la traduction de cette trajectoire de consommation, avec la même décomposition, en termes de gaz à effet de serre. D'autres modèles permettent, moyennant l'introduction des hypothèses nécessaires, de caractériser également la contribution du résidentiel aux projections sur le volet économique (investissements, emplois...) ou environnemental (empreinte matériau...).</p>	

Éléments de discussion

Points forts	<p>La démarche repose sur une agrégation globale de consommations qui, en fonction des secteurs et sous-secteurs et des usages donc des modèles ou outils mobilisés, est plus ou moins détaillée mais qui repose en général sur une modélisation bottom-up partant des usages, et souvent proche d'indicateurs liés aux niveaux de service énergétique. La modélisation du secteur du bâtiment s'intègre dans une suite qui couvre l'ensemble des secteurs de consommation tout en intégrant une série de modules d'évaluation transversale, avec toutefois l'inconvénient de ne pas permettre, compte-tenu de la grande diversité des modèles et de l'hétérogénéité de leur approche, un véritable bouclage, celui-ci devant être assuré par des itérations manuelles.</p> <p>L'approche développée dans cette modélisation, consistant à traiter l'ensemble du secteur du bâtiment comme un tout, même si certains des outils utilisés sont spécifiques au résidentiel ou au tertiaire, et si les hypothèses sont différencierées pour chaque segment, permet notamment d'avoir une approche intégrée du parc bâti, incluant le cas échéant des transferts de surface entre les secteurs.</p>
Questionnements et développements	<p>La modélisation porte sur les consommations annuelles d'énergie, et ne vise pas avec son architecture à traiter des aspects de puissance, donc des pics d'appel sur l'électricité ou le gaz.</p> <p>Concernant la caractérisation du parc, une modélisation des résidences secondaires et logements vacants, et de l'évolution de ce stock est prise en compte. Il n'y a en revanche pas d'hypothèses sur l'évolution du parc tertiaire vacant. La part des surfaces ne consommant pas dans chaque branche est implicitement comprise dans les données moyennées fournies par le CEREN que le modèle utilise comme entrée. Mais le fait que la baisse de l'emploi dans certaines branches tertiaires soit susceptible de générer du tertiaire vacant n'est pas spécifiquement pris en compte (en dehors du secteur des bureaux).</p> <p>Dans le résidentiel, l'utilisation de Res-IRF permet d'intégrer des hypothèses détaillées telles que le montant des aides à la rénovation thermique, les contraintes réglementaires telle que l'obligation de décence des logements, etc. Cela permet de prendre en compte, dans une certaine mesure, des évolutions différencierées au sein de la population en lien avec le pouvoir d'achat. Le modèle raisonne d'une manière générale par décile de revenus au sein de la population, et permet par exemple d'introduire des hypothèses d'aide aux ménages modulées par décile. La modélisation permet de regarder les enjeux de précarité énergétique, et d'ajuster les politiques publiques modélisées en fonction de calculs sur le reste à charge (pour la rénovation thermique, ou l'interdiction des chaudières fioul ou gaz par exemple).</p> <p>A l'inverse, le modèle Vivaldi pour le chauffage du tertiaire est un modèle plus direct de simulation physique, et pas économique, même s'il permet par exemple de calibrer une évolution des surfaces de bâtiments respectant le décret tertiaire, y compris par branche. La DGEC introduit trois taux de suivi du décret, avec un narratif différencier pour le parc de l'État, des collectivités et le parc privé (dans chaque branche, le parc comprend une part d'existant suivant le décret, une part qui ne le suit pas et une part de neuf qui l'applique). Globalement, c'est l'approche de part d'atteinte du décret qui pilote l'évolution plus ou moins forte à la baisse de la consommation, plutôt que des hypothèses explicites d'efficacité et de sobriété.</p> <p>Dans le tertiaire, l'utilisation d'un indicateur de m² par emploi par branche permet de raffiner les projections en distinguant deux leviers, le nombre d'emplois par branche d'une part et la ration entre surfaces et emplois d'autre part, et de prendre ainsi en compte, par exemple, des effets de transfert. Toutefois, cette évolution est pilotée par la demande économique et n'est pas reliée à l'évolution des parts du parc obéissant plus ou moins aux objectifs du décret tertiaire (du point de vue du mode de calcul, cette articulation pourrait toutefois être introduite).</p> <p>Pour les usages hors chauffage, l'approche est assez peu détaillée. Dans le tertiaire, la méthode est proche de celle du chauffage, avec une projection sur la part du parc se rapprochant du décret tertiaire; des hypothèses plus spécifiques sont prises sur la climatisation (en termes de hausse de la demande et d'efficacité). L'évolution des usages en électricité spécifique, ECS et cuisson est décrite en consommation d'énergie, de façon relativement agrégée, avec une trajectoire à la hausse indexée à la population, respectivement en ménages et en emplois, pondérée selon les scénarios d'un effet plus ou moins poussé à la baisse lié au développement de l'efficacité, voire renforcé par l'application d'une part de sobriété.</p> <p>L'impact du réchauffement climatique est pris en compte de manière implicite dans l'atteinte des objectifs du DEET. Pour la climatisation, il est pris en compte de façon endogène sur l'évolution de la demande dans MICO.</p> <p>La modélisation prend par ailleurs en compte l'enjeu de l'artificialisation, avec le souci d'être conforme aux objectifs de la loi sur le zéro artificialisation nette (ZAN), tout en tenant compte des besoins de surfaces agricoles. L'outil part des chiffres fournis par l'Observatoire de l'artificialisation et prend en compte les données sur les nouveaux m² de construction neuve. À date, la suite de modèles de la DGEC n'est pas connectée au modèle artificialisation du CGDD.</p> <p>Globalement, les modèles sectoriels utilisés n'intègrent qu'à la marge une approche territoriale. C'est particulièrement le cas des modèles sectoriels résidentiel et tertiaire, qui ne permettent donc pas de projeter une répartition différencier de l'évolution de la population sur le territoire. Mais il serait par exemple possible d'intégrer un outil pour tenir compte d'une telle répartition dans les besoins de construction neuve, sans impacter le fonctionnement d'ensemble pour la suite de la modélisation. C'est l'avantage de la méthode d'agrégation bottom-up mise en œuvre par la DGEC pour l'élaboration des trajectoires de pouvoir introduire une couche complémentaire en un point ou un autre de la suite de modèles sans déséquilibrer l'ensemble.</p> <p>Sur la partie marco-économique, qui repose sur les hypothèses d'entrée et s'appuie sur les modèles Three-ME et Imaclim-R, l'approche est ouverte mais n'est pas construite pour envisager des points de rupture. En particulier, cette modélisation ne prend pas en compte l'impact du changement climatique, a fortiori celui de catastrophe, mais fonctionne au contraire selon une logique de continuité par rapport aux variables fournies en entrée. Néanmoins, la méthode bottom-up présente là encore l'avantage de pouvoir modéliser des contraintes fortes sur les investissements en faveur par exemple de la rénovation thermique.</p>
Besoins identifiés	—
Méthode	—

Positionnement dans la cartographie



Outils et modèles

Sous l'appellation de **modèle sectoriel** se cache en fait une suite complexe d'outils mobilisés pour établir, par agrégation de trajectoires portant sur des segments du parc bâti et/ou sur des usages spécifiques et croisement avec des modèles plus transverses, une projection des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre du résidentiel-tertiaire inscrite dans une modélisation complète de l'économie et compatible avec des objectifs généraux de politique énergétique et climatique au niveau national. Cette suite est basée sur des modèles technico-explicites de simulation incrémentale, ouverte, des consommations énergie, reposant soit sur une description désagrégee physique de l'évolution du système, soit sur une part de simulation de comportements d'agents pilotée par les prix ou les politiques publiques. L'ensemble comprend également, pour l'évaluation de différents enjeux transversaux, des modélisations de type entrée-sortie ou macro-économique.



Champs et paramètres

La modélisation intègre et articule différents champs, de manière parfois complexe. En premier lieu, en cohérence avec la volonté de simuler des projections de consommation d'énergie dans les bâtiments selon une logique « bottom-up » et physiquement explicite, la suite mobilisée couvre prioritairement les trois dimensions directement liées à cette analyse :

- la dimension des **bâtiments**, décrite respectivement sous forme de nombre de logements, avec leur surface moyenne, et de surface d'activité par branche pour le tertiaire, auxquels sont attachés des caractéristiques telles que leur performance énergétique ;
- celle des **équipements**, qui comprend les systèmes de chauffage, d'eau chaude sanitaire et de climatisation, caractérisés en termes de nombre et de performance, et les autres équipements, plutôt décrits par leur efficacité et leur consommation moyenne, l'ensemble étant croisé avec les vecteurs énergétiques utilisés ;
- enfin, celle des **ressources**, qui comprend d'abord, dans les outils de construction de la trajectoire, les consommations d'énergie réparties par vecteur – et les calculs d'émissions de gaz à effet de serre associées – mais intègre également, dans l'analyse transversale, l'empreinte en matériaux.

Au-delà, cette modélisation intègre bien sûr la dimension **population**, même si celle-ci intervient plutôt comme donnée d'entrée du calcul des surfaces que dans la modélisation elle-même, le nombre d'habitants, traduit en nombre de ménages répartis dans les catégories de logements ou d'actifs répartis par branche, n'étant qu'une donnée d'entrée du calcul de surfaces. La suite d'outils touche également à la dimension des **coûts**, via des calculs agrégés en investissements comme des calculs macro-économiques, qui retombent également sur le nombre d'emplois. Enfin, un module traite partiellement, via un calcul d'artificialisation, de la dimension des **sols**.



Chaînages et bouclages

Cette suite combine le recours à des modèles développés par d'autres acteurs et des outils propres à l'opérateur DGEC. À l'exception de quelques éléments, comme l'articulation entre les données démographiques fournies par **Omphale** et leur entrée dans les modèles sur les usages, elle comprend toutefois peu de chaînages opérationnels, et encore moins de bouclages.

Elle obéit davantage à une logique de juxtaposition et de croisements de différents outils. Ainsi, la juxtaposition obéit au besoin d'utiliser différents outils existants (**Res-IRF**, **Vivaldi**, **MICO...**), complétés par quelques modules ad hoc, pour couvrir l'ensemble des segments bâimentaires du résidentiel et du tertiaire et l'ensemble des usages de l'énergie dans ces bâtiments. Le croisement correspond à la volonté de vérifier la cohérence de la trajectoire ainsi reconstituée avec différents objectifs et enjeux sur les émissions de gaz à effet de serre, la consommation de matériaux ou encore les coûts.

Plus largement, il faut souligner également que cette suite, en elle-même complexe, s'inscrit dans un ensemble de modélisation plus large, où d'autres modèles sectoriels, eux-mêmes plus ou moins construits par agrégation de différents outils, sont mobilisés pour construire une trajectoire globale.



Questions et enjeux

La suite d'outils composant ce modèle sectoriel est construite pour répondre à une finalité précise d'élaboration de la SNBC. De par la richesse de ces outils, elle peut s'ouvrir à différents questionnements identifiés comme peu ou mal couverts, mais la complexité de son architecture et l'hétérogénéité des outils et la difficulté à faire évoluer leur articulation rend l'intégration de nouvelles problématiques peu évidente.

La suite aborde déjà plusieurs des questionnements relatifs à la **complétude technique**, comme l'empreinte en matériaux ou l'usage des sols, et pourrait être renforcée dans une perspective d'analyse en cycle de vie. Elle pourrait également progresser sur la couverture du parc bâti. De la même manière, elle traite déjà via certains de ses outils des enjeux relatifs aux **dynamiques socio-économiques**, qu'il s'agisse de la réponse aux mécanismes de prix ou, dans sa dimension transversale, de l'évaluation en emplois, et pourrait élargir son champ pour approfondir certains sujets.

Elle pourrait également, dans une moindre mesure, s'ouvrir par une vision plus prospective à des aspects liés aux **dynamiques sociétales**, qu'elle aborde peu, en particulier lorsqu'ils peuvent être approchés par une modélisation bottom-up explicite, comme les nouveaux usages ou l'adaptation climatique. Elle semble en revanche moins adaptée pour répondre aux questionnements sur les **dynamiques territoriales**, et encore moins sur la **réponse aux crises**.

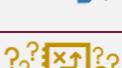
A24. Mésange (DG Trésor / INSEE)

Outil		
Modèle / outil	Mésange	Ce modèle d'équilibre général macro-économétrique fournit un outil d'évaluation des effets macroéconomiques d'évolutions projetées dans des scénarios prospectifs
Porteur(s)	DG Trésor / INSEE	
Développeur(s)	DG Trésor avec l'INSEE	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	—	
Prise d'information	Entretien conduit le --/-/2023. Fiche validée le --/-/2023.	
Ressources	https://www.insee.fr/fr/information/3605738 https://www.persee.fr/doc/estat_0336-1454_2012_num_451_1_9744	
Modèle général		
Finalité	Mésange (Modèle Économétrique de Simulation et d'ANalyse Générale de l'Économie) est un modèle macro-économétrique trimestriel de l'économie française.	
Type d'outil	Il s'agit d'un modèle d'équilibre général (MEG) macro-économétrique visant notamment à permettre la simulation des effets macro-économiques de politiques publiques.	
Champ de modélisation	Le modèle propose une estimation quantitative des liens entre différentes variables macro-économiques sous l'effet de différentes variations, et s'applique à l'évaluation, en amont, de l'impact à l'échelle de l'ensemble de l'économie de politiques publiques ou de variations exogènes.	
Usage type / périodicité	Le modèle Mésange, développé et utilisé conjointement par l'Insee et la DG Trésor, est généralement disponible pour l'évaluation de différentes politiques publiques, à la fois pour fournir un cadre de recommandations de politique économique, et dans le cadre d'études d'impact. Il permet une évaluation ex ante de potentielles réformes. Il peut dans ce cadre s'appliquer à l'évaluation des politiques de transition énergétique, comme il l'a été après le Grenelle de l'environnement en 2007 pour en estimer les impacts macroéconomiques (avec une conclusion générale sur l'impact positif à court et moyen terme des investissements prévus pour stimuler la croissance et l'emploi, s'annulant au-delà d'une quinzaine d'années par rapport au scénario de référence).	
Architecture	<p>Le modèle représente l'ensemble de l'économie française, à l'échelle macroéconomique, et décrit celle-ci à travers un ensemble de branches d'activité, d'agents économiques, et d'équations les mettant en relations.</p> <p>La répartition de l'activité en branches a évolué pour mieux tenir compte de l'exposition croissante de l'économie française, que l'outil modélise comme une « petite économie ouverte » (c'est-à-dire sans modéliser les phénomènes extérieurs, mais en prenant en compte les échanges), à la concurrence internationale. Mais elle reste très agrégée, et loin d'une description sectorielle telle qu'on l'observe par exemple dans les modèles technico-économétriques.</p> <p>Dans la version initiale, le modèle distinguait simplement trois branches : (i) la branche manufacturière, représentant l'industrie; (ii) la branche non manufacturière, incluant l'agriculture, l'énergie, la construction et tous les services marchands ; et (iii) la branche non marchandise, par opposition aux deux précédentes branches marchandes. Un module ad hoc séparant en partie le bloc énergie avait également été introduit. Dans la version actuelle, le modèle introduit un secteur énergie spécifique et sépare les services marchands en un secteur de services dits « exposés » à la concurrence d'un secteur de services dit « abrité », regroupant ainsi les 17 branches de la comptabilité nationale en cinq grandes branches :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'agriculture (inclus la sylviculture et la pêche) et l'industrie (inclus les activités de transformation, et la fabrication de denrées, d'équipements et de biens); • l'énergie, inclus les industries extractives, le raffinage, la production d'énergie, la gestion des déchets ; • les services exposés, qui regroupent principalement les transports et l'entreposage, l'information et la communication, les activités financières et les activités scientifiques et techniques ; • les services abrités, qui concernent essentiellement la construction, le commerce, l'hébergement et la restauration, les activités immobilières, et le reste des activités de services ; • les services non marchands, qui incluent l'administration, l'enseignement, la santé et l'action sociale. <p>La modélisation est dès lors basée sur la représentation comptable de l'économie complète et cohérente que fournissent les comptes nationaux trimestriels.</p> <p>Elle distingue également plusieurs types d'agents : les ménages, les entreprises et les administrations publiques (le reste du monde, dans le cadre des échanges avec la France, étant également assimilé à un agent du point de vue de l'offre et de la demande).</p> <p>L'évolution de l'économie est dès lors modélisée grâce à un ensemble complexe d'équations (environ 500 initialement, 1800 dans la dernière version) mettant en jeu les différents agents. Celles-ci sont de trois types : des identités comptables, qui reproduisent la cohérence entre les principaux agrégats de la comptabilité nationale (par exemple l'équilibre entre ressources et emplois) ; des équations techniques ; et les plus importantes, soit une cinquantaine d'entre elles, qualifiées de « structurelles » et qui modélisent des comportements économiques. Ces équations économétriques, qui reflètent les hypothèses de modélisation, modélisent le comportement d'une variable donnée (emploi salarié, consommation des ménages, prix...) conformément au cadre théorique de long terme du modèle. Les coefficients qu'elles mettent en jeu sont estimés sur la base des tendances passées telles qu'observées dans les comptes trimestriels. Parmi ces équations, les plus importantes portent sur le comportement des entreprises, sur la détermination des salaires, et sur l'équilibre entre l'offre et la demande à long terme (qui résulte de l'équilibre ressource-emploi).</p>	
Rythme d'actualisation	Le modèle est mis à jour de façon régulière à travers des exercices dits de « réestimation » des équations économétriques, qui fournissent aussi l'occasion d'introduire des nouveautés de modélisation, en lien avec des besoins nouveaux ou spécifiques. La version originale du modèle, finalisée en 2000-2002, a été construite sur la base des comptes nationaux trimestriels en base 1995 ; elle a été réévaluée en 2007 sur la base des comptes nationaux, produits à partir de 2006 en base 2000. Une nouvelle version a été produite en 2016-2017, sur la base des comptes nationaux produits en base 2010, en introduisant	

		deux enrichissements : une répartition sectorielle plus fine d'une part, et une distinction du marché du travail en deux catégories selon le niveau de qualification.
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre par nature l'ensemble des bâtiments, incluant le résidentiel, le tertiaire et les bâtiments industriels et agricoles, mais il ne procède ni d'une désagrégation recouvrant cette logique sectorielle, ni d'une description identifiant spécifiquement les bâtiments en tant qu'objets économiques.
	Usages	La modélisation macro-économique décrit l'intégralité de l'économie française, incluant donc l'ensemble des bâtiments et des activités qu'ils suscitent (construction, rénovation ou réhabilitation, démolition...) et qu'ils abritent (activités tertiaires, activités non marchandes des ménages...). Faute d'une description explicite des bâtiments en tant que support d'activité, il ne distingue toutefois pas spécifiquement ces activités.
	Population	Le modèle prend par construction l'ensemble de la population en compte, y compris son évolution démographique, mais ne la décrit pas en tant que telle.
Périmètre géograph.	Échelle	La modélisation porte sur l'ensemble de l'économie française, à l'échelle nationale.
	Territoire	L'outil fonctionne au périmètre national, incluant la France métropolitaine et les territoires d'outre-mer.
Périmètre temporel	Horizon	L'horizon de temps du modèle n'est pas déterminé : il procède par simulation pour évaluer les impacts de politiques publiques ou de chocs exogènes à différentes échéances, la limite venant plutôt de l'interprétation des résultats dans le temps long que de la modélisation au sens du calcul.
	Pas temporel	Le pas temporel du modèle est trimestriel, à l'image du rythme des comptes nationaux trimestriels.
Principes de calcul		<p>Globalement, la modélisation proposée par Mésange obéit, pour le court-moyen terme, à un esprit dit « néo-keynésien », où les effets de demande sont prédominants, et pour le moyen-long terme à un esprit plutôt « quasi-classique », où les comportements sont davantage structurés par le cadre macro-économique théorique et déterminés par l'offre.</p> <p>Les principales équations portent sur les étapes suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • en lien avec les besoins en travail et en capital, qui sont les deux « facteurs », ou ressources prises en compte par le modèle, une première série d'équations déterminent l'évolution de la demande • l'évolution des dépenses des ménages permet parallèlement de déterminer celle de la consommation finale, avec une modélisation de la part de chaque secteur dans la consommation agrégée ; • la boucle prix-salaires est traitée via des équations de modélisation de l'évolution des salaires, et celle des prix d'offre et de demande ; • un bloc commerce extérieur permet la modélisation de l'évolution des exports et des imports, en lien avec la construction d'indicateurs de compétitivité ; • enfin, un ensemble spécifique porte sur la modélisation du bloc non marchand et du bloc de finances publiques, inclus une modélisation dédiée des recettes publiques et des dépenses publiques, permettant de représenter l'introduction de signaux fiscaux ou de montants exogènes pour des dépenses de soutien en investissement ou en subvention à certaines politiques.. <p>D'une manière générale, cette modélisation se joue à un niveau trop agrégé pour s'appliquer à des calculs sectoriels relatifs au secteur du bâtiment. Certains aspects importants pour la trajectoire de ce secteur peuvent toutefois être plus ou moins explicitement traités.</p> <p>Tout d'abord, l'immobilier joue un rôle important dans les investissements modélisés, calculés sous forme de formation brute de capital fixe (FBCF) : pour les entreprises, l'investissement dans les bâtiments associés à des services « abrités » est identifié avec une part significative ; pour les ménages, une part prépondérante (85 % en valeur 2015) de l'investissement ainsi défini est consacrée à l'immobilier, avec la construction de logements neufs et travaux de gros entretien, les 15 % restant correspondant pour l'essentiel à des services notariaux et financiers associés.</p> <p>Par ailleurs, le rôle de la consommation d'énergie, même si l'agrégation ne permet pas de l'analyser spécifiquement au niveau des bâtiments, peut également être analysé depuis l'inclusion de l'énergie dans le modèle comme une branche à part entière : en effet, elle est de ce fait modélisée de manière systématique, prenant en compte les comportements de demande, les prix et les échanges extérieurs. Elle est modélisée comme une consommation intermédiaire des entreprises, dépendant à la fois de leur volume de production mais également des prix de l'énergie, et comme une part de la consommation en valeur des ménages, qui dépend là aussi des prix de l'énergie.</p>
Entrées		Les données d'entrée du modèle reposent sur l'ensemble des données issues des comptes publics trimestriels, ainsi que sur les différents coefficients techniques ou d'élasticité déterminés par les modélisateurs pour dimensionner les nombreuses équations en jeu. Lorsque les politiques publiques, réformes ou chocs externes envisagés ne trouvent pas facilement une traduction directe dans les termes du modèle, une analyse préalable doit être menée pour introduire dans les données paramétrables les modifications adaptées.
Sorties		Le modèle restitue sur cette base une trajectoire d'évolution de l'économie, permettant d'en mesurer le contenu par la comparaison de trajectoires, dans le détail comme au niveau d'indicateurs macroéconomiques agrégés ou semi-agrégés tels que l'emploi (global ou par branche), le pouvoir d'achat, la croissance, la balance commerciale, etc.
Éléments de discussion		
Points forts		<p>Le modèle Mésange apporte à l'évaluation des politiques de transition la cohérence d'un bouclage macroéconomique, ainsi qu'une capacité, de par sa structure, à projeter des impacts à relativement long terme – et donc à contribuer à la prospective. Il présente toutefois la difficulté, du point de vue d'une modélisation de la transition énergétique dans le secteur du bâtiment et de l'immobilier, de ne pas être suffisamment désagrégé pour séparer les effets qu'il peut modéliser sur ce secteur de résultats plus larges.</p> <p>Le fait que l'énergie soit prise en compte comme un secteur à part entière dans la dernière version du modèle permet toutefois de modéliser des effets liés à la consommation et aux prix de l'énergie, même s'ils ne peuvent pas être analysés distinctement pour les seules consommation dans le bâtiment.</p>
Questionnements et développements		D'une manière générale, les modèles macroéconométriques tels que Mésange ont d'abord été développés pour examiner d'autres types de politiques, en particulier budgétaires. Ils ne peuvent ainsi s'adapter à l'examen de politiques sectorielles sur les transports, le bâtiment ou l'énergie que si elles restent d'ampleur modérée et produisent un faible impact sur les processus de production.

Ainsi, la modélisation appliquée à l'énergie se heurte à une limite, qui touche au fait que le modèle ne traite de l'énergie que sous l'angle de la demande, et non comme une ressource pour les entreprises, ce qui l'empêche de prendre en compte les arbitrages qu'elles pourraient faire de ce point de vue, par exemple en investissant dans des processus de production moins intensifs en énergie, ou en gaz à effet de serre quand il s'agit de mesure l'impact d'une taxe carbone. En pratique, cet arbitrage doit être modélisé « hors modèle », dans le cadre d'une maquette dédiée, dont les résultats en investissements etc. sont ensuite injectés dans **Mésange** pour évaluer l'impact macroéconomique. Ce type de modélisation fine nécessite une caractérisation détaillée de certains paramètres – dans cet exemple, le mix énergétique, l'état du parc immobilier et automobile, les technologies de production industrielle – qui ne paraît pas envisageable dans le cadre d'un modèle macroéconomique agrégé complexe comme celui-ci.

Une autre limite du modèle, commune aux modèles macro-économétriques (par opposition notamment aux modèles d'équilibre général calculable, comme **Imaclim-R**) est que chaque catégorie d'agent économique prise en compte est décrite sous forme de comportement moyen – le modèle est dit « à agents représentatifs ». Cela ne permet pas de prendre en compte l'hétérogénéité de comportements des agents d'un type donné face à différents signaux, notamment d'ajustement des comportements par les prix.

Besoins identifiés	Données	—
	Méthode	—
Commentaires	Selon une publication récente de la Direction générale du Trésor, le modèle Mésange intègre plus spécifiquement depuis l'été 2023 un module permettant d'évaluer l'impact des réformes et chocs économiques sur les émissions de gaz à effet de serre et sur le bouquet énergétique. Faute d'éléments documentaires disponibles, ce développement n'a pas été pris en compte.	
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	Mésange est un modèle d'équilibre général macro-économétrique visant notamment à permettre la simulation des effets macro-économiques de politiques publiques, à l'échelle de l'économie française.
	Champs et paramètres	L'approche strictement macro-économétrique de cet outil implique que, même s'il intègre par nature l'ensemble des dimensions, il ne les représente de façon explicite que dans la dimension économie . Dans ce cadre, il travaille notamment de manière explicite, en lien avec d'autres dimensions comme la population ou les bâtiments, sur des éléments tels que les ménages représentatifs, ou sur l'immobilier comme composante importante de l'investissement des entreprises et des ménages.
	Chaînages et bouclages	Ce modèle est par nature un outil bouclé, non chaîné à d'autres modèles. Il se prête toutefois, pour certaines analyses dont les termes ne peuvent pas être directement traduits dans ceux de ses calculs d'équilibre, à un chaînage avec des maquettes dédiées, c'est-à-dire des modules ad hoc externalisés permettant de produire les données d'entrée dont il a besoin.
	Questions et enjeux	De par son caractère volontairement macro, appliqué à l'ensemble de l'économie, cet outil se prête peu à l'exploration de questionnements relatifs au secteur du bâtiment et de l'immobilier. En l'absence ou presque d'éléments descriptifs spécifiques, il reste loin de sujets relatifs par exemple à la complétude technique ou aux dynamiques territoriales; à l'inverse, sur des thématiques qu'il aborde plus ou moins directement, comme les dynamiques socio-économiques ou la réponse aux crises, avec la possibilité de modéliser notamment des chocs de prix (sous réserve qu'ils ne remettent pas en cause le cadre économique de long terme dans lequel s'inscrit Mésange), l'outil n'est pas conçu pour identifier spécifiquement des impacts liés au secteur du bâtiment. Il intègre toutefois des éléments permettant peut-être d'aller un peu plus loin sur ces questions, comme l'évaluation spécifique de l'immobilier dans l'investissement.

A25. OTELO (DHUP / Cerema)

Outil		
Modèle / outil	OTELO	<i>Le modèle permet une projection des besoins de logements à l'échelle d'un territoire donné, en fonction de l'état du parc et des hypothèses démographiques.</i>
Porteur(s)	DHUP / DGALN, CEREMA, Fabrique Numérique (depuis Mai 2023)	
Développeur(s)	DHUP, CEREMA	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Pierre-Olivier FAURE Adjoint à la Cheffe de bureau des études économiques - DGALN/DHUP/FE5 Luc BERCEGOL Chargé de mission - DGALN/DHUP/FE5 Adresse mail générique Gérée par le bureau FE5 (DGALN/DHUP)	pierre-olivier.faure@developpement-durable.gouv.fr luc.bercegol@developpement-durable.gouv.fr otelo@developpement-durable.gouv.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 21/02/2023. Fiche validée le 31/07/2024.	
Ressources	https://otelo.developpement-durable.gouv.fr/ https://beta.gouv.fr/startups/otelo	
Modèle général		
Finalité	Le modèle permet une projection des besoins de logements à l'échelle d'un territoire donné, en fonction de l'état du parc et des hypothèses démographiques.	
Type d'outil	Il s'agit d'un outil de simulation exploratoire, techno-explicite et descriptif des besoins de logement à l'échelle de bassins d'habitat.	
Champ de modélisation	La modélisation porte sur les besoins de logement, à la croisée de projections relatives à l'évolution de la population et de considérations relatives à l'état et à l'évolution du parc bâti.	
Usage type / périodicité	La DHUP porte l'outil lui-même, le SDES contribue sur les données d'entrée. Le CEREMA est maître d'œuvre sur le projet. Le modèle présente une double finalité : <ul style="list-style-type: none">• au niveau national, OTELO contribue aux travaux de prospective énergétique de l'État (PPE, SNBC, SFEC etc.), en établissant le besoin en logements. D'autres outils et bureaux sont mobilisés : sous-direction Qualité de la construction (en charge de la réglementation du neuf, des labels, de la stratégie de rénovation), Service de l'économie verte et solidaire (SEVS) du CGDD (études plus dédiées à la modélisation), ONRE (rénovation) etc.• au niveau territorial, OTELO est un outil mis à disposition d'un certain nombre d'acteurs : les collectivités territoriales pour leur PLH, SCoT, PLUi etc., les services déconcentrés de l'état (DDT), les agences d'urbanisme et BE qui travaillent avec collectivités, depuis peu les bailleurs sociaux, le CEREMA, les délégations régionales de l'INSEE etc.	
Architecture	L'outil proposé consiste en un module de calcul qui projette, à partir des données relatives au territoire considéré en termes de parc de logements et de démographie et d'un paramétrage confié à l'utilisateur sur certains facteurs, un besoin de logements. Celui-ci distingue un besoin dit «en stock», correspondant aux besoins non couverts à l'état initial (situations de mal-logement), et un besoin dit «en flux», projetant la demande potentielle en fonction des hypothèses retenues. L'application OTELO est conçue pour être utilisée au niveau des territoires. En tant que tel, l'outil ne permet pas la modélisation nationale. Cependant au niveau national, la DHUP reboucle le modèle avec un tableau.	
Rythme d'actualisation	L'outil est actualisé annuellement avec les nouveaux millésimes disponibles sur l'ensemble des briques composant le besoin en logements.	
Périmètre technique	Bâtiments	L'évaluation proposée par OTELO porte sur le besoin en construction : elle est estimée en prenant en compte l'ensemble du parc résidentiel, incluant les logements vacants et résidences secondaires. Les logements tertiaires (logements en résidence, résidences séniors, résidences étudiantes etc.) ne sont pas pris en compte.
	Usages	L'outil porte sur le besoin d'occupation de logements et ne concerne pas des usages spécifiques.
Périmètre géograph.	Population	La population couverte est celle de l'ensemble des ménages à l'échelle du territoire considéré, selon une logique de bassins d'habitat.
	Échelle	La modélisation est construite selon une logique de bassins d'habitat, regroupant chacun plusieurs Établissements publics de coopération intercommunale (EPCI), à l'intérieur de chaque région. L'ensemble de ce maillage forme une projection à l'échelle nationale. Un parcours à l'échelle EPCI est également proposé aux utilisateurs.
	Territoire	Le modèle couvre au total la France entière, DROM compris (excepté Mayotte). Pour les DROM, des scénarios spécifiques peuvent être pris en compte pour les projections de ménages, sur demande de la DREAL/DR INSEE locale.
Périmètre temporel	Horizon	Le modèle fournit des projections à des horizons de temps prédéterminés, mais la construction de scénarios d'évaluation qu'il propose intègre deux horizons dont la durée est paramétrable : l'horizon dit de «résorption», qui correspond au nombre d'années que l'on estime nécessaire pour répondre au mal-logement à un rythme annuel constant, et qui est paramétré par défaut à 20 ans, et l'horizon dit de «projection», auquel on souhaite projeter les besoins en logement, fixé par défaut à 6 ans mais paramétrable dans l'outil entre 1 et 29 ans. Cette projection est établie à partir de l'année de référence d' OTELO , qui est 2021, ce qui permet une projection jusqu'à 2050.
Principes de calcul	Pas temporel	L'outil calcule un besoin au pas de temps correspondant à l'horizon de projection paramétré par l'utilisateur, en années, soit 6 ans par défaut ou toute période jusqu'à 2050.
		OTELO permet de déterminer le besoin en logements d'un territoire, à partir des dynamiques démographiques, d'un état du parc bâti et d'un jeu d'hypothèses. Par nature, il permet la régionalisation de ces données.

A sein d'une région, il repose sur une partition du territoire en deux échelles imbriquées : les EPCI sont en effet regroupés en bassins d'habitat, correspondant à l'échelle du marché local de l'habitat (l'espace géographique au sein duquel les ménages opèrent leur choix résidentiel).

À l'échelle d'un bassin d'habitat, qu'il peut décomposer pour l'utilisateur à l'échelle d'un ou plusieurs EPCI, l'outil calcule un besoin total à travers la combinaison de deux besoins :

- le **besoin «en stock»**, qui correspond à la résorption, à un rythme paramétrable, des situations existantes de mal logement ou de non logement (l'horizon de résorption jouant ici un rôle structurant pour quantifier le nombre de nouveaux logements nécessaires au rythme annuel pour répondre à ce besoin) ;
- le **besoin «en flux»**, ou demande potentielle, calculé en croisant une projection démographique fournissant l'évolution du nombre de ménages, et donc du nombre de résidences principales nécessaires, et des hypothèses relatives à l'évolution du parc de logement. Celles-ci combinent essentiellement quatre facteurs : le taux de résidences secondaires et le taux de vacance, définis dans le modèle sous la forme de valeurs cibles paramétrables, le taux annuel de restructuration du parc et le taux annuel de disparition de logements.

La projection démographique s'appuie sur les projections de population sur la période 2018-2050 établis par le modèle **Omphale** de l'INSEE sur la base d'hypothèses contrastées de natalité, de mortalité et de migration, en retenant trois scénarios d'évolution centrale, de population haute et de population basse. Ces projections de population sont converties en projections de nombre de ménages selon une méthode conçue en partenariat par l'INSEE et le SDES pour projeter différents scénarios de décohabitation, avec trois possibilités (poursuite de la tendance, accélération, décélération). Le paramétrage propose au final, en croisant ces deux niveaux, neuf scénarios de projection du nombre de ménages autour du scénario central pour la population et d'évolution tendancielle pour la cohabitation, paramétré par défaut. Le paramétrage permet ainsi de moduler des hypothèses nationales, telles que le vieillissement de la population, pour les décliner dans les contextes locaux.

Pour les besoins de stock, la caractérisation de l'état du parc inclut l'identification du mal logement dans le parc privé : inadéquation financière, suroccupation des logements, logement de mauvaise qualité (au sens fonctionnel, et pas seulement énergétique).

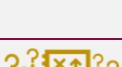
Les logements vacants et résidences secondaires sont identifiés, sur la base du recensement de la population (donnée publique) et des données fiscales de la taxe d'habitation (donnée non publique), avec une difficulté liée à la porosité entre logement vacant et résidence secondaire selon la période de temps considérée. L'hébergement chez un tiers ou les situations hors logement sont également considérés.

Entrées	L'outil fonctionne essentiellement avec trois types d'entrées. Les premières sont l'ensemble des données relatives à la caractérisation au point de référence (2021), par territoire, de l'état démographique et de l'état d'occupation du parc de logements. Le modèle repose ensuite sur l'utilisation territorialisée des projections démographiques construites par l'INSEE. Pour finir, il a besoin d'un paramétrage sur les différents facteurs constitutifs de la projection des besoins : les horizons de résorption et de projection, l'évolution de la cohabitation, les cibles de niveau de vacance et de résidences secondaires, les taux annuels de restructuration et de disparition de logements, et les différentes briques du besoin en stock.
Sorties	En sortie, le modèle fournit, à l'horizon de temps choisi, une projection de l'évolution du nombre de ménages à l'échelle du territoire, et un besoin en logements neufs, adossé plus globalement à une projection de l'état d'occupation du parc de logements sur le territoire.

Éléments de discussion

Points forts	La principale valeur ajoutée de cet outil est de permettre une projection territorialisée et régionalisée des besoins en logements, à l'échelle des bassins d'habitat, et à l'échelle de l'EPCI qui fait plus sens du point de vue des politiques publiques. Le modèle s'appuie pour cela sur des données statistiques source très détaillées.
Questionnements et développements	L'outil apporte une brique qui se veut complémentaire d'autres outils et études. Parmi les sujets de réflexion, ce modèle ne travaille pas sur la qualité thermique des logements. En lien avec les travaux menés par l'ONRE, un développement futur pourrait être envisagé.
Besoins identifiés	Données L'outil est actuellement basé sur l'enquête logement de 2013. Une nouvelle enquête a eu lieu en 2020, dont l'analyse est en cours.
	Méthode L'outil actuel comporte des hypothèses d'évolutions pré-déterminées, le paramétrage ne permettant que de choisir entre quelques scénarios. Dans la future version en cours de développement, l'utilisateur pourra entrer un scénario «à façon», directement en nombre de ménages, ce qui permettra d'inclure des variantes d'hypothèses de cohabitation par exemple.

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	OTELO est un modèle techno-explicite de simulation des besoins de logement en fonction d'hypothèses démographiques et d'objectifs en matière d'occupation, à l'échelle territoriale des bassins d'habitat, sur un horizon de temps pouvant s'étendre jusqu'à 2050.
	Champs et paramètres	Le modèle n'intervient que sur deux dimensions du champ considéré, en travaillant directement sur la relation entre la dimension bâtiments et la dimension population . Sur la première, il se concentre sur le parc résidentiel et choisit comme unité fonctionnelle celle du logement, en incluant l'ensemble des leviers susceptibles d'affecter leur nombre. Sur la seconde, il considère la population sous forme de ménages, reliant cette unité au nombre d'individus par un facteur de cohabitation.
	Chaînages et bouclages	Cet outil s'inscrit par nature dans des démarches de construction de trajectoires et de planification à l'échelle des territoires, ou par extension au niveau national, dans lesquelles il apporte une brique importante mais pas nécessairement suffisante. Il a, à ce titre, vocation à être combiné avec d'autres outils dans les exercices de projection dans lesquels il intervient. Toutefois, cette articulation semble n'intervenir qu'au cas par cas, et de manière artisanale, plutôt que via un travail de chaînage au niveau des outils. La nature désagrégée, descriptive et explicite de cet outil devrait pourtant permettre davantage d'interfaçage technique, à condition toutefois d'accéder, pour une utilisation nationale, à sa version consolidée à cette échelle.
	Questions et enjeux	Le périmètre de cet outil est limité par rapport à l'ensemble des facteurs prospectifs et des questionnements identifiés, mais il présente un potentiel intéressant. En premier lieu, il se prête de par sa construction à une ouverture, du point de vue des scénarios, aux réflexions sociétales relatives à

l'évolution de la population et de ses besoins. Ensuite, il permet bien sûr, là encore par construction, d'intégrer aux réflexions prospectives une différenciation de ces besoins selon les territoires, tout en couvrant la situation de territoires spécifiques, y compris par son extension aux DROM. Enfin, il pourrait jouer un rôle important, en regard de la problématique d'adaptation au changement climatique, dans la construction de projections tenant compte de l'impact de cette question sur la répartition de la population sur le territoire national.

A26. Modèle demande électrique (EDF)

Outil		
Modèle / outil	Modèle demande énergie.(LM)	
Porteur(s)	EDF	
Développeur(s)	EDF R&D	<i>Les deux modules considérés, l'un consacré au résidentiel et l'autre au tertiaire, s'intègrent dans une suite à usage interne développée par EDF pour modéliser les consommations futures d'électricité dans une perspective d'équilibre du système électrique.</i>
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Marie-Hélène LAURENT Département TREE (Résidentiel)- EDF R&D Fabrice DECELLAS Département TREE (Tertiaire)- EDF R&D Didier ROUSTAN Directeur de programme - EDF R&D	marie-helene.laurent@edf.fr fabrice.decellas@edf.fr didier.roustan@edf.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 16/02/2023. Compléments apportés par les auteurs le 03/10/2023. Fiche validée le 17/10/2024.	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	Ce modèle vise à projeter, dans le cadre d'analyses portant sur le système électrique et son bon fonctionnement, une évolution à long terme se voulant réaliste de l'ensemble de la demande d'énergie (électricité et autres vecteurs : gaz, pétrole, chaleur, biomasse, charbon, hydrogène).	
Type d'outil	Il s'agit d'un ensemble d'outils de simulation par agrégation de l'évolution de la demande d'énergie par usage de l'énergie, combinant une approche bottom-up et une approche macro (cadrage démographique et macro-économique).	
Champ de modélisation	Le modèle s'inscrit dans le cadre d'un ensemble plus vaste portant sur l'ensemble du système énergétique, en énergie, GES et puissance.	
Usage type / périodicité	La principale finalité des études réalisées à partir du modèle est d'alimenter une politique d'entreprise et des investissements, dans une démarche réaliste et prudente, sans nécessairement de visée normative sur des objectifs de nature environnementale, via la modélisation de l'équilibre offre/demande. Le modèle est développé pour une utilisation interne. Il sert essentiellement de support à un exercice de projection de la demande énergétique mené annuellement.	
Architecture	Il s'agit d'un outil complexe, composé de plusieurs modèles principaux (chaîne de modélisation).	
Rythme d'actualisation	Le modèle évolue en fonction des besoins en interne, notamment pour son actualisation annuelle, et de l'état des connaissances.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre l'ensemble de la demande en énergie, tous secteurs confondus, et modélise dans ce cadre la demande des secteurs résidentiel et tertiaire, qui font l'objet des modules décrits par la suite.
	Usages	En termes d'usage, le modèle couvre l'ensemble des consommations d'énergie, décomposées en leurs usages principaux et alimente d'autres modèles assurant la traduction en puissance.
	Population	Le modèle permet de tenir compte des dynamiques démographiques.
Périmètre géograph.	Échelle	L'échelle de modélisation est nationale.
	Territoire	Le modèle est utilisé dans le cadre d'études récurrentes ou ponctuelles portant sur la France métropolitaine, 14 autres pays européens, ainsi que la Chine. Des modèles spécifiques existent pour la Corse et pour les DROM, pour prendre en compte les spécificités de ces territoires tant du point de vue de la nature de systèmes électriques insulaires que du climat ou des usages.
Périmètre temporel	Horizon	L'outil simule l'évolution à différents horizons (actuellement 2060).
	Pas temporel	Le modèle simule une évolution de la demande au pas annuel.
Principes de calcul	<i>Voir modules spécifiques</i>	
Entrées	<i>Voir modules spécifiques</i>	
Sorties	<i>Voir modules spécifiques</i>	
Détail		
Module spécifique	Module résidentiel	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre le parc des Résidences Principales. Les consommations des logements vacants et des résidences secondaires sont incluses dans celles des résidences principales. Le parc évolue d'année en année en fonction des taux d'entrée et de sortie du parc de résidences principales.
	Usages	La modélisation intègre l'ensemble des consommations d'énergie des bâtiments résidentiels, avec la répartition entre vecteur énergétique. Projetés en énergie, puis traduits en puissance.
	Population	L'outil projette les besoins de l'ensemble des ménages constituant la population nationale au périmètre de la France métropolitaine (pour la France).
Périmètre géograph.	Échelle	Le modèle traite le parc comme un ensemble à l'échelle nationale et ne propose pas de découpage territorial intra-métropolitain. Toutefois, la typologie permet de différencier maisons et appartements et logements anciens et neufs.
	Territoire	<i>Voir modèle général</i>
Périmètre temporel	Horizon	<i>Voir modèle général</i>
	Pas temporel	<i>Voir modèle général</i>
Principes de calcul	Le module résidentiel procède selon une approche bottom-up basée sur une modélisation simplifiée du parc de résidences principales. Cette modélisation simplifiée s'appuie sur des modèles moins détaillés. On peut citer le modèle de micro-simulation physique basé sur un parc de 4 000 résidences	

		<p>principales décrites dans une enquête interne réalisée en 2018 et enrichi par l'enquête Phébus(2012), donne une description du bâti et opère un croisement avec une base sur les revenus des ménages). L'outil procède ensuite pour chaque type de logement, en fonction de ses caractéristiques (forme, niveau de performance, occupation, localisation, équipement, etc.) à un calcul physique de la consommation du logement. Ce calcul est relativement simplifié, mais prend en compte l'inertie du bâtiment avec 3 zones (jour, nuit, non chauffé), dans l'objectif de fournir un résultat suffisamment précis sur l'appel de puissance par logement. Le nombre élevé de logements traités permet une modélisation du foisonnement à l'échelle du parc. Ces modèles sont validés en énergie et en puissance.</p>
Entrées		<p>Le modèle se nourrit d'abord d'hypothèses démographiques, sur la croissance de la population et l'évolution du nombre et de la taille des ménages, qui constituent le principal déterminant. Pour projeter de manière plus fine l'évolution de la demande en énergie, et plus spécifiquement en électricité, le modèle intègre de nombreuses hypothèses de changements techniques et comportementaux. On peut par exemple ainsi paramétriser différentes hypothèses de rapidité et de profondeur de la rénovation thermique, de vitesse de remplacement des équipements avant leur obsolescence technique, par exemple sous l'effet de politiques publiques comme la sortie du chauffage au fioul au profit des PAC. Sur la partie comportementale, des hypothèses exogènes sont possibles. Le comportement des ménages n'est pas endogène au modèle, mais les changements de comportement font l'objet d'hypothèses tenant compte du contexte macro-économique et des prix des énergies propres à chaque scénario.</p> <p>Les hypothèses des scénarios intègrent également des contraintes et des freins aux évolutions, comme la capacité d'installation des filières du chauffage ou de la rénovation du bâti. Ces hypothèses s'appuient sur ce qui s'est fait par le passé, par exemple sur TREMI pour le rythme de rénovation, ou ce qui se fait dans d'autres pays, par exemple le constat que même l'Allemagne n'arrive pas à massifier la rénovation globale, celui de la rapidité de déploiement des PAC dans le nord de l'Union européenne, ou encore la tension sur la main d'œuvre pour la pose des PAC au Royaume-Uni, etc. L'objectif est de se baser, grâce à ce retour d'expérience, sur des hypothèses réalistes.</p> <p>Par ailleurs, le modèle prend en compte dans la projection des consommations et des comportements l'impact possible de l'évolution future du climat.</p>
Sorties		<p>Le modèle principal fournit une projection de la consommation en énergie pour l'ensemble des énergies consommées dans le secteur résidentiel. Il fait un calcul en énergie utile et finale. Cette consommation en énergie est ensuite traduite en puissance pour la partie électrique.</p> <p>Ces sorties sont ensuite agrégées à celles des autres secteurs de consommation afin de permettre un couplage de ces projections avec les futurs moyens de production au niveau français et européen.</p> <p>Enfin, il produit une évaluation des émissions de gaz à effet de serre associées, au scope 1 et 2 qui correspondent aux émissions directes du secteur et à celles émises lors de la production des énergies consommées dans le secteur. Il n'intègre pas en revanche de modélisation du besoin en matériaux.</p>
Éléments de discussion		
Points forts		<p>Le module résidentiel est un modèle simplifié mais qui s'appuie sur des modèles plus détaillés (4000 logements) permettant la modélisation fine pour la puissance (modèle physique avec inertie et zonage).</p>
Questionnements et développements		<p>Un travail de différenciation territoriale est en cours et fait l'objet d'autres modèles.</p> <p>Le modèle principal est un modèle de prospective de long terme, il n'est pas destiné à modéliser des bouleversements rapides de court terme. L'évolution de la demande dans le bâtiment obéit à des dynamiques rapides, comme l'a illustré l'effort de sobriété au cours de l'hiver 2022-2023, mais surtout à des dynamiques plus longues, telles que la mise en œuvre de la rénovation thermique ou l'évolution des modes de vie. A ce stade, le modèle n'est pas utilisé pour projeter une société où les modes de vie auraient radicalement évolué.</p> <p>Par ailleurs, le modèle se concentre dans son approche physique sur la quantification en consommation d'énergie et en émission de gaz à effet de serre et n'intègre pas de modélisation du besoin en matériaux.</p>
Besoins identifiés	Données	<p>Le développement se heurte à une forme de raréfaction de la donnée publique. Il y a sans doute un impact de la RGPD, mais pour renforcer la modélisation il est nécessaire de disposer de données en open-data.</p> <p>Par exemple, l'enquête Logement n'est plus publique (celle de 2013 l'était, les résultats de celle de 2020 ne le sont que partiellement, on dispose par ailleurs de résultats indirects du CEREN). Les données disponibles publiquement ne sont pas couplées aux données des impôts (même anonymement) pour croiser les données sur les logements avec le niveau de revenu des ménages. La raison invoquée est la RGPD, mais ce point est central pour le besoin d'analyses. Il doit être possible de rendre publiques des données anonymisées. L'accès est réservé à des acteurs publics (ex: le CIRED). Il serait utile pour EDF d'accéder au moins à l'enquête logement sans données de revenus. De même, les données de l'ADEME sur le DPE sont intéressantes mais la base est touffue, non représentative en l'état, et la version redressée n'est pas accessible.</p> <p>Pour le calcul en puissance, on dispose d'encore moins de données que sur l'énergie. La modélisation s'appuie sur des données internes d'EDF ou des données d'Enedis, mais des dernières ne précisent pas la typologie de logements.</p>
Méthode	—	
Détail		
Module spécifique	Module tertiaire	
Périmètre technique	Bâtiments	<p>Le module couvre l'ensemble du parc tertiaire.</p> <p>Le parc tertiaire est décrit de façon complète à travers 6 branches + éclairage public. L'une d'elles, sous la rubrique « Autres », regroupe 3 des traditionnelles branches du CEREN (SPCL, Habitat Communautaire, Transport) et les activités dont les consommations ne sont pas suivies de façon récurrente par le CEREN, comme les bâtiments de l'armée, le traitement de l'eau. La complétude est assurée par un rebouclage macro, au sens où la consommation de ce secteur doit correspondre au complément des autres secteurs(Résidentiel, Industrie, Transport, Agriculture).</p> <p>Ainsi, ce module inclut par exemple les entrepôts logistiques et l'artisanat mais pas les bâtiments agricoles.</p>

	Usages	L'outil intègre toutes les consommations d'énergie, par vecteur énergétique (décomposition en 7 usages hors éclairage public, traité comme une branche à part).
	Population	Les corps d'hypothèse démographiques servent essentiellement à calibrer l'évolution du parc de bâtiments par branche (population totale, population en âge de travailler, population scolarisable, population > 65 ans).
Périmètre géograph.	Échelle	Le parc tertiaire est traité comme un ensemble à l'échelle nationale, sans découpage territorial intra-métropolitain. Toutefois, des particularités territoriales peuvent être prises en compte dans cette agrégation nationale via des modules spécifiques (ex : climatisation) permettant de calibrer certaines hypothèses à la maille nationale.
	Territoire	Voir modèle général
Périmètre temporel	Horizon	Voir modèle général
	Pas temporel	Voir modèle général
	Principes de calcul	<p>L'outil est un modèle simplifié couvrant l'ensemble du Tertiaire. La variable pivot du modèle est la surface de bâtiments (distinction parc antérieur à l'année de référence et parc construit à compter de l'année de référence). Le calcul des consommations est basé sur un triptyque parts de marché des énergies / besoins (énergie utile) / rendements des systèmes. La reconstitution des besoins suit un processus de complexité variable selon les usages considérés. Les parts de marchés sont reconstituées via une approche en flux (hypothèses de flux de substitutions vecteur à vecteur,...).</p> <p>Il ne s'agit pas d'un modèle physique bottom-up: le modèle est précis en rebouclage, mais pas physique dans la modélisation. Il se source sur les données CEREN et d'autres sources de natures diverses (exemple: publications de type PREBAT), intégrant par exemple des retours d'expérience sur des rénovations profondes pour déterminer des ratios qui sont ensuite appliqués aux segments du parc.</p> <p>Le modèle est confronté à la nécessité de limiter la prise en compte de l'hétérogénéité du parc dans sa description, et fonctionne dès lors par regroupements. Cela permet de limiter la complexité de la modélisation, en s'appuyant pour assurer la cohérence sur le recollement macro.</p>
Entrées		<p>Les données d'entrée sont de trois types:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Données de référence: bilan énergétique à date de référence (CEREN, SDES, Enerdata,...), données INSEE (VA, Emploi,...) • Données liées aux scénarios: grandeurs socio et macro-économiques (PIB, VA, Emploi, démographie,...), politiques énergétiques, prix des énergies, ambiance générale, • Hypothèses calibrées à partir de données internes ou externes (rendements des systèmes, effet des rénovations,...) et des narratifs des scénarios.
Sorties		Consommations par vecteur énergétique, branche et usage (nomenclature spécifique 7 vecteurs/6 branches/8 usages à l'heure actuelle mais en évolution) par scénario et année de projection. La puissance, qui ne concerne que l'électricité, est traitée via des modèles tiers.
Éléments de discussion		
Points forts		<p>La finalité du modèle EDF est d'alimenter une politique d'entreprise et des investissements au travers de scénarios. Le modèle autorise toutes sortes de scénarios, normatifs ou exploratoires. La nature du scénario et son narratif déterminent directement celle des résultats.</p> <p>Une importance particulière est donc prêtée à la cohérence des scénarios et notamment au bouclage macro-économique, lequel est garanti par le modèle produisant les grands corps d'hypothèses macro-économiques (Oxford Economics).</p>
Questionnements et développements		<p>Le tertiaire est très hétérogène et très mal documenté : il reste compliqué de baser un modèle précis sur des données de référence qui ne rendent qu'imparfaitement compte de cette hétérogénéité. Des travaux sont en cours afin de mieux tenir compte des hétérogénéités territoriales. Ces travaux, qui reposent notamment sur la confrontation de données CEREN, INSEE et des DLE (données locales de l'énergie, c'est-à-dire données du distributeur), font émerger des difficultés du fait des divergences entre sources et de leur fiabilité (par exemple, affectation sectorielle des consommations de gaz).</p> <p>Par ailleurs, un point notable pour la modélisation est que la consommation de chauffage n'est pas majoritaire, et que le driver principal de certains usages spécifiques de l'électricité n'est pas forcément le m²(froid, IT etc.)</p>
Besoins identifiés	Données	<p>Il y a un manque de données très important de manière générale sur le tertiaire : on est non seulement confronté à la très grande hétérogénéité du secteur, mais également à des définitions et périmètres qui ne sont pas homogènes, etc.</p> <p>De plus, beaucoup de secteurs à l'intérieur du tertiaire restent très sous-documentés (comme l'armée, le traitement de l'eau, etc.) et le périmètre n'est pas évident à définir. Dans le modèle, par défaut c'est une définition par « bouclage » : le tertiaire c'est tout ce qui ne rentre pas explicitement dans les autres secteurs.</p> <p>Sur des points plus spécifiques, on peut noter une divergence avec le CEREN sur la consommation de la climatisation : les retours de terrain divergent. EDF utilise un modèle plus physique, dont les résultats se rapprochent plus de l'outil MICO de l'ADEME.</p> <p>EDF a lancé il y a quelques années une initiative proche de celle du CSTB avec la BDNB du CSTB, ce qui pose la question d'une convergence qui pourrait être organisée. Globalement, EDF est inquiet du niveau d'ouverture des données en possession des pouvoirs publics ou de leurs opérateurs, et de son évolution : on comprend le besoin d'un modèle économique pour les données du CSTB, de même que les contraintes de confidentialité de certaines données (données fiscales par exemple), mais il faut aussi prendre en compte l'intérêt pour la communauté de développer l'open data et le partage de données.</p>
Méthode	—	
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	 <p>Ce modèle est un support à la scénarisation de l'évolution de la demande d'énergie. Il est fondé sur une description explicite des consommations d'énergie en général, et plus spécifiquement d'électricité, inscrite dans une démarche d'agrégation bottom-up mais intégrant des éléments de rebouclage top-down. Il traite l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires sur le périmètre national, au pas annuel pour l'énergie et au pas horaire pour les consommations d'électricité en puissance.</p>



Champs et paramètres

À l'image de la plupart des modèles dédiés à la projection de consommations d'énergie du bâtiment et construits selon une logique de représentation désagrégée et explicite de ces consommations, le modèle d'EDF opère essentiellement sur les trois dimensions nécessaires à cette analyse: celle des bâtiments, avec une description concrète sur la base de cohortes de logements types pour le résidentiel et de surfaces de catégories de bâtiments tertiaires; celle des équipements, intégrant par exemple les systèmes de chauffage et de climatisation et l'ensemble des appareils consommateurs d'énergie; enfin celle des occupants et de leurs comportements.



Chaînages et bouclages

Cet aspect n'a pas été spécifiquement exploré. EDF dispose autour de l'enjeu majeur que constitue pour elle la projection de la demande électrique de nombreux outils, plus ou moins intégrés ou chaînés. Le modèle décrit ici est lui-même un outil intégrateur de différents sous-modèles, eux-mêmes plus ou moins connectés à d'autres.



Questions et enjeux

Le modèle de demande électrique développé par EDF n'a pas été interrogé sous l'angle prospectif, son utilisation semblant en l'état plutôt tournée vers une visée plus opérationnelle. EDF souligne que les modèles sont bâtis pour soutenir la production de scénarios, que leur caractère « prévisionniste » ou « prospectif » découle de ce fait directement des narratifs des scénarios et des corps d'hypothèses retenus, et qu'il est possible de les utiliser dans le cadre d'exercices normatifs, visant par exemple la neutralité carbone (en émissions directes). L'approche de modélisation développée par EDF avec cet outil présente en tous cas différents aspects intéressants: ainsi, sa volonté d'inscrire l'évaluation de la consommation des différents segments du parc bâti dans une quantification globale et bouclée se rapproche des questions relatives à la complétude du parc, et son approche très désagrégée fait écho aux enjeux identifiés sur la modélisation de l'évolution des usages ou la prise en compte d'une typologie détaillée des logements et surfaces tertiaires différenciée selon les territoires.

A27. Modèle demande électrique (Enedis)

Outil		
Modèle / outil	Modèle demande élec. (pas de nom)	Cet outil vise, pour les besoins internes d'Enedis, à projeter l'évolution des sollicitations du réseau de distribution d'électricité par la demande des secteurs résidentiel et tertiaire.
Porteur(s)	Enedis	
Développeur(s)	Enedis	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Bastien GAUTHIER Chef de projet à la Direction de la stratégie - Enedis Gaëlle MBOCK Cheffe de projet à la Direction de la stratégie - Enedis	bastien.gauthier@enedis.fr gaelle.mbock@enedis.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 12/10/2023. Compléments apportés par les auteurs le 07/11/2023. Fiche validée le 09/07/2024.	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	L'outil, développé au sein de la Direction de la stratégie d'Enedis, est destiné à éclairer les enjeux spécifiques de l'évolution du réseau de distribution électrique dans la perspective de la transition énergétique, pour capter des dynamiques locales et ainsi identifier des zones susceptibles de nécessiter des renforcements et adaptation du réseau de distribution d'électricité sur le périmètre Enedis (95% du territoire français continental). Cette dimension n'est traitée ni dans les exercices relevant par exemple de la Commission prospective systèmes et réseau (CPSR) de RTE ni par des outils travaillant plutôt à la maille du bâtiment ou du quartier. La spécificité de cet outil est donc de développer une prospective à visée locale mais à l'échelle nationale.	
Type d'outil	Il s'agit d'un modèle de simulation principalement technico-explicite de l'évolution de la consommation d'énergie visant à projeter l'évolution de la courbe de charge électrique, avec une construction exploratoire mais une visée plutôt prospective.	
Champ de modélisation	L'outil s'inscrit dans le champ de la modélisation de la consommation d'énergie, au sein de laquelle des modules traitent plus spécifiquement de la consommation des bâtiments.	
Usage type / périodicité	L'outil est développé et utilisé par la Direction de la stratégie pour les besoins internes d'Enedis. Le travail prospectif est notamment destiné aux directions régionales, pour nourrir leur estimation des besoins techniques d'évolution du réseau et leur fournir des éclairages sur les enjeux de long terme sur lesquels s'appuier dans leurs échanges avec les collectivités territoriales.	
Architecture	— Cœur de calcul en C, avec divers modules de préparations de données	
Rythme d'actualisation	—	
Périmètre technique	Bâtiments Usages Population	Voir module spécifique
Périmètre géograph.	Échelle Territoire	L'outil d'Enedis travaille à une maille territoriale pertinente pour la projection des besoins du réseau, en représentant par exemple des groupements de bâtiments aux points de départ de son réseau. Le modèle s'applique à la France continentale sur le périmètre couvert par Enedis.
Périmètre temporel	Horizon Pas temporel	Plusieurs années en prospectif: le modèle n'a pas de limite, en dehors de la disponibilité des entrées et du besoin. Par exemple résultats à 2050, 2060. Le modèle fonctionne à un double pas: un pas annuel pour les hypothèses globales sur l'évolution de la demande et des usages, un pas horaire pour la modélisation des courbes de charge déduites de cette demande.
Principes de calcul	Globalement, le modèle repose sur la constitution de courbes de charge locales, calées sur la connaissance des données actuelles, pour les travailler ensuite selon différents paramétrages dans le cadre de scénarios prospectifs.	
Entrées	L'outil d'Enedis travaille à partir de données sur l'évolution démographique et sur l'évolution de l'activité économique, et sur la base d'un calibrage précis de la consommation d'énergie actuelle, à la maille du réseau. Il intègre ensuite différentes hypothèses d'évolution des principaux déterminants de la consommation d'énergie qu'il modélise.	
Sorties	Il produit essentiellement sur cette base la consommation annuelle, ainsi que des courbes de charge au pas horaire, projetées sur les différentes années couvertes par la modélisation.	
Détail		
Module spécifique	Modules résidentiel et tertiaire (pas de nom)	
Périmètre technique	Bâtiments Usages Population	Pour le résidentiel, le modèle couvre l'ensemble du parc, décrit à une maille locale assez fine, en constituant des ensembles de logements / bâtiments présentant des caractéristiques identiques. Pour le tertiaire, il couvre l'ensemble des branches, décrites via un raisonnement en surface rapporté au niveau d'activité. L'outil couvre l'ensemble des usages pouvant générer une consommation d'électricité dans les bâtiments résidentiels et tertiaires. La population n'est pas modélisée au sens d'individus, mais pleinement prise en compte dans la modélisation à travers différents indicateurs, qu'il s'agisse de sa croissance globale ou de la pyramide des âges, du taux d'occupation des logements ou de l'évolution des effectifs dans différentes branches de l'économie.
Périmètre géograph.	Échelle Territoire	Voir modèle général.

Périmètre temporel	Horizon	Voir modèle général.
	Pas temporel	Voir modèle général.
Principes de calcul		<p>L'objectif des modules bâtiments, en lien avec les autres parties du modèle global, est de constituer des courbes de charge locales pour la consommation électrique des bâtiments afin de projeter l'évolution de ces courbes selon différentes hypothèses de transition énergétique.</p> <p>Pour le résidentiel, l'unité de compte initiale est le logement, mais le modèle procède par « clustérisation », c'est-à-dire qu'il regroupe les logements en unités plus grosses de logements ou de bâtiments présentant les mêmes caractéristiques selon la typologie multicritères retenue. L'outil utilise en particulier des proxys pour approcher les caractéristiques des logements, comme leur niveau d'isolation ou leur inertie thermique.</p> <p>Pour le tertiaire, les données disponibles ne permettent pas d'autre approche qu'un raisonnement en surface, sur la base des branches CEREN et d'une évolution socio-économique. Celle-ci prend en compte des hypothèses démographiques et de croissance par branche pour projeter des effectifs par branche, et appliquer un facteur entre le nombre d'emplois et les surfaces occupées. Le modèle s'appuie sur les données CEREN au niveau national et régional mais aussi sur des données internes permettant de descendre au périmètre d'Enedis.</p> <p>Les consommations d'énergie sont ensuite calibrées et projetées en intégrant des paramètres de performance du bâti et des équipements et des hypothèses d'utilisation pour calculer une consommation par usage, respectivement par unité de logements et par unité de surface tertiaire.</p> <p>L'outil permet, une fois les consommations et courbes de charge (re)constituées, d'appliquer des hypothèses sur différents leviers, comme :</p> <ul style="list-style-type: none"> • des hypothèses sur l'évolution du parc, sur la construction neuve, le type et la taille des nouvelles unités construites, et le rythme de démolition et de réhabilitation / rénovation ; • des hypothèses sur la rénovation thermique, qui procèdent par raisonnement en rénovations « équivalentes » sur un certain volume avec un certain effet, à un niveau plus macro, plutôt qu'en termes de type et de nombre de gestes techniques de rénovation, et en cherchant à tenir compte notamment pour le résidentiel, des phénomènes de type effet rebond via des hypothèses complémentaires ; • des hypothèses sur l'évolution du parc de chauffage, construites en tenant compte des conditions locales, par exemple de l'existence de réseaux de chaleur. <p>Le modèle permet, à travers la projection des évolutions locales qu'il agrège au niveau national, de vérifier la cohérence du bouclage à cette échelle, et de vérifier la cohérence des hypothèses appliquées à cette échelle locale avec les ambitions affichées au national.</p>
Entrées		Pour la partie socio-économique, le modèle utilise des données démographiques de l'Insee à la maille locale, complétées par des hypothèses sur la dynamique à l'échelle locale et nationale. Il utilise ensuite des données fines sur la consommation d'électricité à l'échelle locale pour calibrer le point d'origine des évolutions de cette consommation ainsi que des courbes de charge qu'il modélise. Ces évolutions sont construites à partir d'hypothèses sur les principaux leviers identifiés.
Sorties		Le modèle fournit sur cette base les volumes de consommation et les courbes de charge, par usage et par catégorie de bâtiment, à la maille du réseau.
Éléments de discussion		
Points forts		
<p>L'outil d'Enedis semble assez unique dans son appréhension de la complexité du lien entre la maille locale, à l'échelle de laquelle il modélise et la cohérence nationale, à l'échelle de laquelle il assure un bouclage.</p> <p>Pour ce qui est du résidentiel, le modèle se caractérise également par une modélisation dynamique du comportement thermique des bâtiments, dans la traduction des services énergétiques en courbe de besoin de chauffage ou de climatisation, tenant compte non seulement de leur performance mais également de leur inertie, de leur occupation (apport des occupants et des équipements en fonctionnement) et de leur environnement (prise en compte des scénarios prospectifs de température de Météo France).</p>		
Questionnements et développements		
<p>Grâce à son caractère techno-explicite, le modèle se prête assez bien, malgré la complexité de son objet, à des évolutions. Celles-ci restent toutefois limitées, dans la mesure où cet outil nécessite des jeux de données importants, car il repose sur des données de consommation à une maille très fine. La complexité du modèle est donc une contrainte forte, pour assurer notamment des temps de calcul raisonnables.</p> <p>L'une des spécificités de ce modèle est de pouvoir croiser à la maille locale les enjeux d'évolution du bâtiment et de ses usages avec le développement du photovoltaïque (PV). Le PV est traité localement de la même manière, mais les charges correspondantes sont calculées et affectées par zone – la méthode ne nécessite pas de les affecter par bâtiment. À l'inverse, l'impact de l'implantation du PV sur les usages, dans une logique d'optimisation recherchée par les occupants, doit être pris en compte : Enedis mène sur ce sujet des réflexions exploratoires.</p> <p>Sur la question des impacts du changement climatique, les enjeux peuvent concerner l'évolution des besoins de climatisation, et l'impact sur la répartition de la population sur le territoire. Si le modèle se prête en théorie à une modélisation fine d'effets de ce type, cela reste difficile en l'absence de cartographie exhaustive des zones potentiellement moins habitables, voire inhabitables à différents horizons de temps.</p> <p>Sur le tertiaire, la prise en compte des enjeux climatiques est plus compliquée, car moins directe. Le besoin de climatisation est plutôt modélisé via une projection basée sur l'observation des dynamiques actuelles.</p> <p>Dans cette modélisation, il n'y a pas besoin d'une finesse statistique sur les variations météorologiques locales comme celle que RTE a demandé à Météo France, mais il y a besoin de connaître la dérive du climat, autrement dit de caractériser le climat « normal » de 2050.</p> <p>Dans la mesure où le modèle repose sur une caractérisation du comportement thermique des bâtiments tenant compte de leur performance et de leur inertie, plusieurs questions peuvent se poser, comme par exemple celle des effets liés aux îlots de chaleur, qui s'avère difficile à traiter. De même, la question des bonnes pratiques d'aération pour réduire les besoins de climatisation peut être posée, une réflexion est en cours pour l'intégrer dans la modélisation mais cela reste à l'état de R&D. Un autre exemple concerne les solutions de climatiseur mobile, qui déforment la caractéristique du bâti.</p> <p>Le modèle ne traite pas directement de l'artificialisation des sols, mais il en prend en compte certains enjeux, sous la forme de contraintes locales intégrées. L'empreinte au sol est approchée par des</p>		

proxys (méthode d'approximation et de correction), sur la base d'un concept de densité d'habitation nette. Celui-ci désigne le nombre d'habitants rapporté à la surface artificialisée de la commune, et plus cette densité est forte, plus il y a proportionnellement d'habitat collectif. La valeur de densité permet de définir un coefficient d'artificialisation par habitant supplémentaire, avec la possibilité de définir des effets de seuil et besoins de densification.

Le modèle n'établit pas de lien direct entre résidentiel et tertiaire. Il n'intègre pas d'hypothèses de transfert de surface entre les deux secteurs, ni de couplage lié au télétravail. Sur ce point, le module tertiaire peut jouer sur la trajectoire par emplois dans les branches concernées, mais il est compliqué d'identifier l'effet de report sur le résidentiel. Toutefois, le modèle étant techno-explicite, on peut si l'on entre les bonnes hypothèses identifier les conséquences (par exemple sur la cuisson, sur la courbe de charge du chauffage, sur l'effet de charge sur la mobilité...). Il faudrait aussi considérer les effets indirects, par exemple sur la consommation des data centers. On peut tester ces hypothèses et travailler en sensibilité, mais l'intégrer davantage demanderait un développement important, sans certitude qu'il y ait un gain au final.

Sur la question des ruptures, l'enjeu porte davantage sur la scénarisation que sur le modèle. Il est particulièrement techno-explicite, donc on peut faire des hypothèses se rapportant à des changements brutaux. Par exemple, vis-à-vis d'une situation de pandémie, le modèle intègre un paramètre qui porte sur la probabilité de présence des habitants dans un logement (caractérisé à l'échelle du logement, et non de la personne) au pas horaire : on peut modifier ce paramètre, mais la question est toujours celle de la constitution d'un corps d'hypothèses pertinent – ce qui, s'agissant des crises, est particulièrement délicat.

Plus généralement, les crises se caractérisent par des comportement imprévisibles (au sens de non prévus), pour la représentation desquels les modèles ne sont pas adaptés. Les modèles comme celui d'Enedis cherchent par construction à capter des évolutions longues, et non des soubresauts.

Enfin, le modèle se prête, même s'il est construit sur la base d'une description physique, au traitement de certains aspects économiques et sociaux. Sur le tertiaire, les évolutions sont captées via les données de l'INSEE ; les évolutions des effectifs par branche sont non seulement calées sur des projections économiques nationales par branche mais sensibles aux conditions locales comme à la pyramide des âges, avec une évolution dynamique.

Pour le résidentiel, le modèle repose sur une dimension géographique qu'Enedis cherche à affiner sur les usages majeurs (chauffage et climatisation). Des pistes sont à l'étude pour intégrer des éléments socio-économiques comme cela est fait pour la possession des VE ou l'installation de panneaux solaires. Par exemple, des indicateurs rapportés au type de logement permettent de capter certains aspects (lien entre la taille du logement et les revenus, qui peuvent avoir un effet sur le taux d'équipement des ménages...). Mais c'est une complexité difficile à saisir et représenter dans le modèle, qui est plutôt traitée par le biais d'études spécifiques.

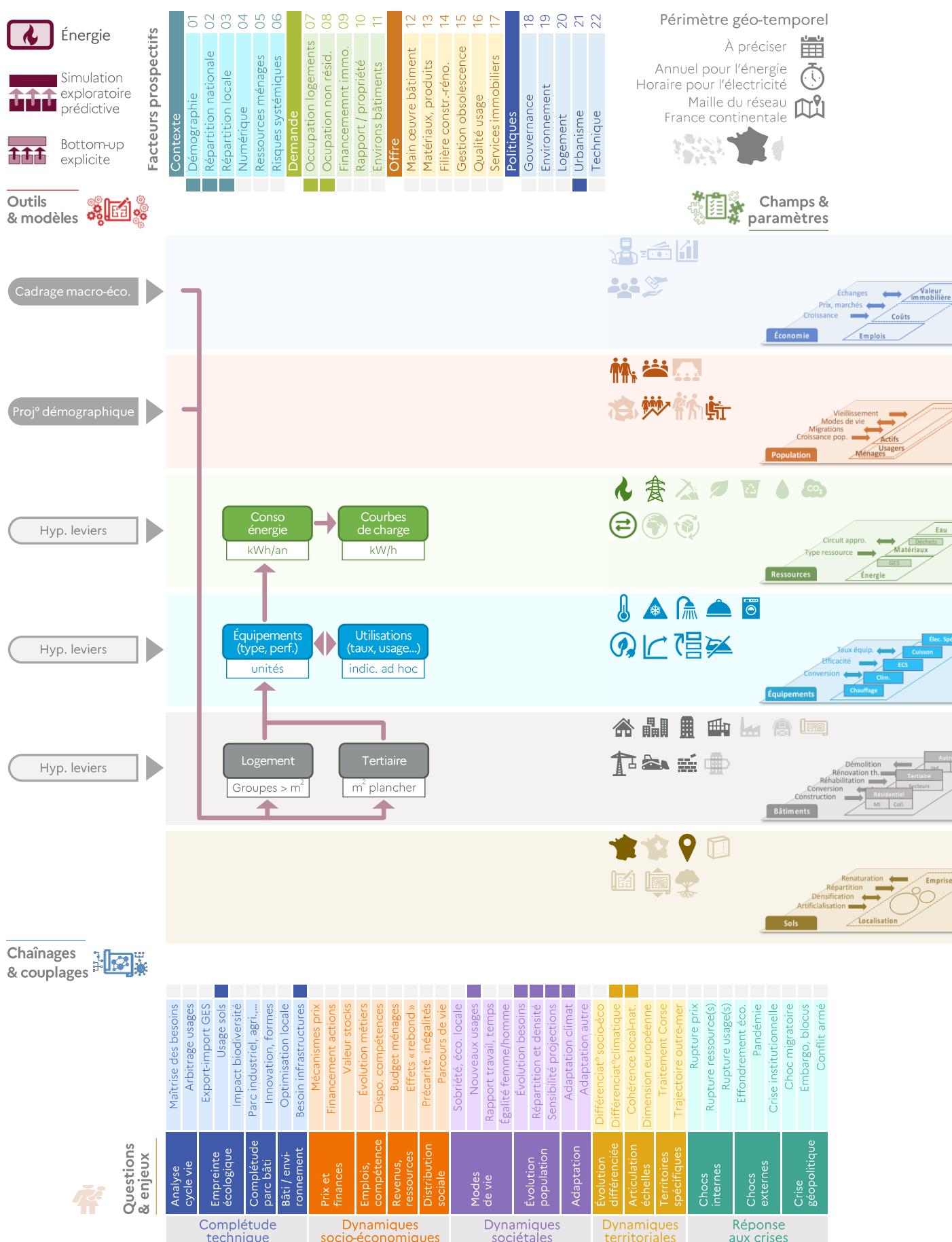
De même, la question de la nature des occupants, propriétaires ou non, n'est pas incluse dans le modèle, alors qu'elle peut par exemple avoir un lien avec les actions de rénovation. Le modèle n'intègre pas non plus de manière complètement satisfaisante la question du parc social, travaillant par approximation faute de disposer des données spécifiques nécessaires à la maille locale du modèle.

Besoins identifiés	Données	—
Méthode		—

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	Ce modèle d'Enedis est un outil orienté énergie de simulation exploratoire à visée prospective, fondé sur une description bottom-up et explicite des consommations d'énergie. Il traite dans ce cadre global l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires sur le périmètre national, à l'échelle du réseau de distribution d'électricité, au pas annuel pour l'énergie et au pas horaire pour les courbes de charge électrique.
	Champs et paramètres	Comme l'essentiel des modèles centrés sur la question énergétique et construits selon une logique bottom-up explicite, l'outil prospectif de modélisation de la demande d'Enedis, appliquée aux secteurs résidentiel et tertiaire travaille pour l'essentiel sur les trois dimensions indispensables à cette analyse, c'est-à-dire celle des bâtiments , des équipements et des ressources . Sur la première, il couvre le parc résidentiel avec la spécificité d'utiliser comme unité fonctionnelle une logique de « clustérisation » des bâtiments à la maille opérationnelle du réseau de distribution. Sur la troisième, il se concentre sur la consommation d'énergie et plus spécifiquement de la courbe de charge qui en résulte pour la demande électrique.
		Pour le modèle tertiaire, la modélisation est plus hybride : elle est en partie économétrique et top-down pour l'évolution du parc, et en partie techno-explicite, pour l'évolution de la consommation unitaire des usages.
		Le modèle intègre dans une moindre mesure les autres dimensions, qu'il s'agisse de données d'entrées ou de paramètres de cadrage relatifs aux dimensions économique et démographique, ou des enjeux liés à l'occupation des sols via les effets d'inertie thermique qui peuvent en résulter.
	Chaînages et bouclages	Cette question n'a pas été explorée, dans la mesure où il s'agit d'un outil purement interne. Le modèle est sans doute articulé à d'autres outils également développés pour ses propres besoins par Enedis, ou éventuellement externes, mais cela relève de problématiques relatives au réseau de distribution électrique et à son bon fonctionnement, hors du champ de la présente analyse.
	Questions et enjeux	Bien qu'il soit construit pour répondre à des besoins assez spécifiques et opérationnels, le modèle se prête bien, par son approche, à une exploration de certains questionnements identifiés dans cette étude. Dans le champ de la complétude technique , il aborde par exemple indirectement la question des usages des sols, et traite directement, avec le réseau de distribution électrique, d'une partie du besoin en infrastructures.
		Il présente également des liens intéressants avec les questionnements relevant des dynamiques sociétales. Cela peut concerner la question des nouveaux usages, ou des questions d'évolution des besoins ou d'impact d'une plus ou moins grande densification. Dans le même esprit, il peut éclairer dans le champ des dynamiques territoriales la question d'une différenciation liée au climat ; il peut surtout informer, sous l'angle qui est le sien, la réflexion sur la cohérence des évolutions entre les niveaux local et national.

Modèle demande électrique (Enedis)



A28. MOSAIC (Enedis / Mines Paris PSL)

Outil		
Modèle / outil	MOSAIC	<i>Simulateur de courbes de charge électrique applicable à un ensemble de bâtiments et permettant d'effectuer des tests de sensibilité sur les paramètres affectant la courbe de charge.</i>
Porteur(s)	Enedis	
Développeur(s)	Enedis / Mines Paris PSL	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	—	
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 03/11/2023 sur la base de la documentation disponible, tenant compte d'éléments fournis par Robin GIRARD dans le cadre de l'entretien sur Building Model et SHAPE-Optim. Fiche validée le 22/10/2024.	
Ressources	https://www.persee.minesparis.psl.eu/Recherche/Groupe-ERSEI/Projets-de-recherche/MOSAIC/	
Modèle général		
Finalité	MOSAIC (pour MOdélisation Simulation et Analyse des flexibilités de Consommation) est un outil avancé de simulation de la consommation d'électricité développé en collaboration par Enedis et le Centre PERSEE de Mines ParisTech.	
Type d'outil	Il s'agit d'un simulateur de courbe de charge électrique destiné à projeter différentes évolutions de cette courbe, selon une approche de type bottom-up explicite et poussée.	
Champ de modélisation	Le modèle s'applique à l'ensemble de la consommation électrique, inclus la modélisation des usages associés à l'électricité dans les bâtiments résidentiels et tertiaires, mais aussi celle du véhicule électrique.	
Usage type / périodicité	Cet outil a été développé pour les besoins opérationnels d'Enedis et est utilisé dans ce cadre interne.	
Architecture	L'outil fonctionne par l'implémentation combinée de modules qui reçoivent et gèrent des données issues de grandes bases permettant de décrire la population et les bâtiments à la maille des consommateurs finaux, ainsi que les conditions météorologiques pour en faire un traitement à la fois physique (description des consommations) et statistique (paramètres macro intervenant dans l'évolution des consommations), selon les modules. Il est ainsi conçu pour simuler, après calibrage des paramètres sur la base des données d'entrée, la consommation horaire d'électricité d'un grand nombre de consommateurs. La calibration est faite à l'échelle de plusieurs milliers de départs HTA sur des courbes observées. L'architecture reste volontairement aussi simple que possible, comme le langage informatique utilisé (R/C++, redéveloppé en Java par ENEDIS), afin de conserver à l'outil sa rapidité d'usage et sa souplesse.	
Rythme d'actualisation	Le simulateur MOSAIC a été développé dans le cadre d'une recherche initiée en 2013 au titre de la collaboration entre Enedis et le Centre PERSEE. Il est actualisé et optimisé au rythme des besoins de son utilisateur Enedis.	
Périmètre technique	<p>Bâtiments Le modèle n'est pas appliqué à un périmètre géographique ou à un parc spécifique, mais capable de traiter l'ensemble des bâtiments du secteur résidentiel et du secteur tertiaire en France.</p> <p>Usages L'outil, de par son objectif opérationnel d'information d'Enedis sur les évolutions possibles de la consommation d'électricité et de la courbe de charge, couvre l'ensemble des usages susceptibles de générer une demande électrique.</p> <p>Population De même que pour les bâtiments, l'outil n'est pas appliquée à la population sur un périmètre prédéterminé, mais prend en compte les caractéristiques démographiques pertinentes, à la maille désaggrégée du point de consommation, pour en déterminer l'évolution.</p>	
Périmètre géograph.	<p>Échelle L'échelle n'est pas fixée mais l'outil travaille à la maille du point de consommation, donc du logement ou du local siège d'une activité tertiaire.</p> <p>Territoire Il n'est pas appliquée à un territoire prédéterminé, et peut couvrir tout territoire en France, jusqu'au niveau national, voire être appliquée à un territoire à l'étranger.</p>	
Périmètre temporel	<p>Horizon MOSAIC ne travaille pas à un horizon défini et ne calcule pas de trajectoire. Il fournit, dans les hypothèses sur l'évolution des déterminants de la consommation qu'on lui fournit, une courbe de charge annuelle, avec une résolution horaire. Cependant, il est utilisé pour faire des modélisations prospectives, mais il faut pour cela renseigner les évolutions macros envisagées (en termes d'évolution des moyens de chauffage, du PV et du véhicule électrique).</p> <p>Pas temporel Le modèle s'applique à une année, et fournit un résultat au pas horaire ou 10 minutes.</p>	
Principes de calcul	L'outil de simulation MOSAIC considère la consommation d'électricité, en énergie et en puissance, comme la somme de contributions à l'échelle micro, c'est-à-dire consommateur par consommateur et usage par usage, dont l'évolution obéit notamment à des paramètres macro à l'échelle nationale tels que la croissance économique ou l'évolution météorologique. Il applique dès lors une approche hybride. Il s'agit de combiner une modélisation physique, essayant d'approcher au plus près, sur la base de grandes bases de données, la caractérisation concrète des dispositifs générateurs des consommations d'électricité et la simulation de son évolution, et un traitement statistique simplifié pour tenir compte des paramètres macros. L'outil comprend des modèles physiques de bâtiments et d'appareils électriques. Pour le résidentiel, cela comprend les équipements de chauffage (radiateurs électriques, pompes à chaleur), d'eau chaude sanitaire (chauffe-eau) et de rafraîchissement (climatiseurs), de lavage (lave-vaisselle, lave-linge, séche-linge), de cuisson (four, tables de cuisson...), de froid (réfrigérateurs, congélateurs...), les téléviseurs et ordinateurs, les éclairages, mais aussi d'autres plus originaux comme les piscines, et des usages divers comme les veilles). Pour le tertiaire, les modèles se rapportent plutôt à des blocs de consommation par type d'acteur du tertiaire, en distinguant bureaux, activités d'enseignement et de recherche, commerces, restaurants et commerces d'alimentation, hôtels, etc. L'outil comprend également un modèle de consommation correspondant à une borne de recharge pour véhicule électrique. Les profils de consommation correspondant peuvent être facilement modifiés pour prendre en compte une évolution des performances ou des conditions d'usage.	

<p>Enfin, l'outil permet de paramétriser, pour les usages hors électricité spécifique qui peuvent faire appel à différents vecteurs énergétiques, les taux de transfert et donc d'équipements concernés utilisant effectivement l'électricité.</p> <p>Chaque contributeur microscopique de la courbe de charge agrégée est identifié dans l'espace, et des caractéristiques de bâtiment, d'équipement et d'usage lui sont attribuées. Sa courbe de charge individuelle peut être calculée, ce qui permet d'introduire les hypothèses d'évolution des bâtiments, des systèmes, des équipements ou des usages à une maille extrêmement fine. L'outil peut simuler rapidement la consommation agrégée de plusieurs milliers de points de consommation dans le secteur résidentiel et tertiaire.</p>		
Entrées	<p>Le modèle a principalement besoin, pour son calibrage, de l'ensemble des données très désagrégées nécessaires sur la population (les ménages), les bâtiments et la météorologie. Il s'appuie notamment sur les données issues du recensement de la population, des données de la base MAJIC notamment pour les surfaces, des informations recueillies par le gestionnaire de réseau sur ses clients, et sur des données météorologiques détaillées concernant par exemple la température ou le niveau local d'irradiation (apport solaire).</p> <p>Du fait de sa construction profondément bottom-up, le modèle peut également prendre en compte des données plus ciblées, à l'échelle microscopique à laquelle il travaille, comme par exemple les spécificités locales en matière de climat, d'habitudes de consommation ou de forme ou d'implantation des bâtiments.</p> <p>Finalement, comme les modèles ont été calibrés sur plusieurs centaines de courbes de départs HTA, ces données peuvent être considérées comme des données « d'entrée ». Même si une nouvelle simulation ne nécessite plus ces données, il peut être envisager avec le temps de refaire ou d'affiner cette calibration.</p>	
Sorties	Courbes de charges	
Éléments de discussion		
Points forts	<p>L'un des atouts de MOSAIC est son caractère intrinsèquement modulaire, qui permet une grande flexibilité d'usage et une grande variété des hypothèses testées. Il permet notamment de jouer sur le niveau d'agrégation et sur le pas de temps pour s'adapter à différents besoins.</p> <p>L'outil ne fournit pas de trajectoire, mais permet à l'inverse des analyses de sensibilité. Il est assez facile de comparer assez différents « tirs », c'est-à-dire mesurer l'écart lié à une certaine variation de performance, de taux de transfert, d'usage, de conditions climatiques ou autre sur la courbe de charge.</p> <p>Une autre force est la calibration sur l'ensemble des courbes HTA qui permet, à l'échelle de quelques milliers de bâtiment, d'avoir une certaine confiance dans la forme de la courbe.</p>	
Questionnements et développements	<p>L'outil de simulation MOSAIC fonctionne en simulant chaque unité séparément, l'unité pouvant être une maison, un appartement, un bureau, un magasin voire une chambre d'hôtel, etc. L'outil est flexible dans le niveau d'information dont il a besoin sur chaque unité pour simuler sa courbe de charge électrique: il lui faut à minima le type d'unité, sa surface, sa position dans le bâtiment si elle ne constitue pas un bâtiment elle-même, son année de construction, sa localisation (à une échelle plus ou moins précise), et la performance globale du bâtiment (déterminée par l'année de construction et la typologie précédente, ou modifiée dans le cas où le bâtiment a fait l'objet d'une rénovation thermique). Ces données nécessaires peuvent être complétées par d'autres informations lorsqu'elles sont disponibles, telles que par exemple l'inertie thermique de la maison ou la hauteur sous plafond (paramètre important surtout pour les bâtiments anciens). Il est ainsi susceptible d'intégrer, en tant que de besoin, de nouveaux paramètres qui deviendraient utiles.</p> <p>De même, l'architecture flexible de l'outil lui permet de prendre en compte de nouveaux bâtiments présentant des caractéristiques ouvertes. Si cela peut s'avérer limitant dans une perspective prévisionnelle, du fait de la difficulté à définir de façon robuste les caractéristiques de nouvelles unités à l'échelle voulue, ce peut à l'inverse être un atout dans une visée plus prospective.</p> <p>Ce caractère modulaire offre également la possibilité d'ajouter aisément de nouveaux usages. Il permet en outre de mesurer l'impact de changements de comportement des consommateurs et de tester des stratégies de gestion de la demande.</p>	
Besoins identifiés	Données	
	—	
Méthode	—	
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil énergie de simulation exploratoire à visée prédictive ou prospective, reposant sur une désagrégation bottom-up et explicite allant jusqu'à la description unitaire de chaque dispositif physique de consommation, pour projeter sur une année la courbe de charge électrique d'un ensemble défini de bâtiments résidentiels et tertiaires.
	Champs et paramètres	L'unité fonctionnelle de l'outil est le logement (dans le résidentiel) ou l'unité tertiaire.
	Chaînages et bouclages	Cette dimension n'a pas été explorée s'agissant de cet outil, qui porte un traitement original du bâtiment mais est délibérément tourné vers la gestion opérationnelle du système électrique. À ce titre, il fait potentiellement l'objet de chaînages ou de bouclages avec d'autres outils dont dispose Enedis, mais ne semble pas connecté à d'autres outils applicables au secteur du bâtiment et de l'immobilier, et n'a en tous cas pas été conçu pour ça. Cependant, la calibration réalisée à partir des données de départ HTA permet d'assurer un bouclage à ces échelles.
	Questions et enjeux	L'outil est la propriété d'ENEDIS qui ne souhaite pas qu'il soit utilisé dans un autre contexte que pour ses besoins propres.

A29. EnerMED (Enerdata)

Outil		
Modèle / outil	EnerMED	<i>Cet outil propose une simulation de la trajectoire de demande énergétique d'un territoire national, inclus les secteurs résidentiel et tertiaire, selon une décomposition ajustable aux besoins et contraintes de différents utilisateurs.</i>
Porteur(s)	Enerdata	
Développeur(s)	Enerdata	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	<p>Marie ROUSSELOT Responsable Développement des Opérations – Enerdata</p> <p>Florent GAUTHIER Responsable Indicateurs et Expertises Sectorielles – Enerdata</p> <p>Aurélien PEFFEN Responsable Prospective et Scénarios – Enerdata</p>	<p>marie.rousselot@enerdata.net</p> <p>florent.gauthier@enerdata.net</p> <p>aurelien.peffen@enerdata.net</p>
Prise d'information	Entretien conduit le 02/11/2023. Fiche validée le 21/08/2024.	
Ressources	https://www.enerdata.net/solutions/enermed-model.html	
Modèle général		
Finalité	L'outil EnerMED propose une solution de modélisation ajustable à différents besoins(en fonction notamment des données disponibles ou du niveau de désagrégation recherché) pour projeter l'impact de différents leviers d'action sur l'évolution de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES).	
Type d'outil	Il s'agit d'un modèle de simulation exploratoire à visée prospective, technico-explicite et fondé sur une désagrégation bottom-up des déterminants de la consommation d'énergie associé à un module de production d'énergie pour déterminer les émissions scope 1 et scope 2.	
Champ de modélisation	Cet outil porte sur l'ensemble de la consommation d'énergie, tous secteurs confondus, et sur la trajectoire d'émissions de GES associée.	
Usage type / périodicité	<p>EnerMED est le modèle développé en propre par Enerdata à partir du modèle MedPRO, et constitue la dernière version des modèles de la famille MEDEE, destinés à produire des trajectoires de demande d'énergie et d'émissions de GES associées pour évaluer l'impact de différentes actions. Le modèle MedPRO a par le passé été utilisé par les pouvoirs publics pour la construction de scénarios de référence pour la stratégie bas-carbone française, mais il ne remplit plus cet usage depuis quelques années, dans la mesure où l'ADEME, la DGEC et les autres services de l'État se sont dotés de différents modèles sectoriels détaillés, dont il s'agit désormais de faire l'intégration. Cependant, le module « Industrie » d'EnerMED est toujours utilisé pour les travaux de la SBNC3 en France et l'ensemble des secteurs EnerMED sont utilisés pour la SNBC2 de la Tunisie.</p> <p>L'outil EnerMED peut être vu comme un générateur de modèles: il n'est pas calé sur la situation française et peut être appliqué dans différents pays ou sur différents territoires en fonction des données de calibration qui lui sont fournies, avec un degré de désagrégation plus ou moins fin et paramétrable. Il est surtout utilisé par Enerdata pour la production de trajectoires de demande énergétique et d'émissions de CO2 dans des pays étrangers.</p>	
Architecture	<p>Le modèle est construit autour d'un module de centralisation des entrées et des sorties sous Excel, qui constitue également l'interface pour l'utilisateur, et d'un module de calcul utilisant le langage informatique Vensim (historiquement choisi pour le codage du modèle de simulation récursif de l'offre et de la demande d'énergie au niveau mondial <i>Prospective Outlook on Long-term Energy Systems</i>, ou POLES, et conservé car il répond bien au besoin d'une analyse année après année).</p> <p>Le moteur Excel fournit l'interface pour paramétriser le type et le niveau de désagrégation choisi et pour entrer les données historiques jusqu'à l'année de référence, et les différentes hypothèses demandées par les modules : des modules sectoriels pour l'industrie, les transports, le résidentiel, le tertiaire et l'agriculture, et un module macro pour le cadrage démographique et macro-économique.</p> <p>Les résultats produits sur cette base par les calculs d'agrégation menés sous Vensim reviennent à l'utilisateur au format Excel, avec des feuilles de sortie fournissant une trajectoire par scénario calculé et différents indicateurs associés.</p>	
Rythme d'actualisation	—	
Périmètre technique	<p>Bâtiments <i>Voir module spécifique.</i></p> <p>Usages <i>Voir module spécifique.</i></p> <p>Population Le modèle fonctionne avec un jeu global d'hypothèses démographiques, portant principalement sur la croissance de la population et sur le niveau de cohabitation dans le logement, mais ne représente pas de façon détaillée les occupants, les actifs ou les usagers dans la formation de la demande sectorielle.</p>	
Périmètre géograph.		
Échelle	Le modèle fonctionne à la maille de tout territoire où le niveau de désagrégation et le détail des données disponibles peuvent le rendre pertinent. Il est typiquement utilisé à l'échelle nationale mais peut être développé sur une zone multi-pays ou régional. La modélisation n'intègre pas de description ou de différenciation plus fine à l'intérieur du territoire auquel le modèle est appliquée.	
Territoire	Le modèle s'applique typiquement à l'échelle nationale et est utilisé pour d'autres pays.	
Périmètre temporel	<p>Horizon L'outil est calibré par défaut pour produire une trajectoire à l'horizon 2050, mais le caractère incrémental de la simulation n'induit pas de limite, et il peut être utilisé à une échéance différente.</p> <p>Pas temporel Le pas de temps de la simulation est par défaut annuel, mais l'outil peut également être calibré sur un pas de temps de cinq ans ou de dix ans.</p>	
Principes de calcul		
	EnerMED est un modèle bottom-up d'agrégation de la demande d'énergie au niveau national et régional. Il analyse la demande d'énergie de façon détaillée par secteur, sous secteur et utilisation finale, en tenant compte de l'état de performance des bâtiments, des véhicules ou des équipements et des choix en termes de technologie et d'usage.	

<p>Le cadrage démographique fournit des projections sur l'évolution du niveau de demande nécessaire pour satisfaire l'ensemble de la population; le cadrage économique fournit des informations sur le niveau de croissance, avec sa répartition sectorielle.</p> <p>L'outil simule dans ce cadre l'évolution détaillée de la demande d'énergie, en calculant pour chaque utilisation finale une demande d'énergie utile. Sur la base des hypothèses fournies sectoriellement par l'utilisateur, il modélise la part de marché et l'efficacité de chaque technologie, pour obtenir la consommation d'énergie finale correspondante.</p> <p>Un module interne plus simple sur l'offre d'énergie (production et importation) fournit les éléments pour traduire cette consommation finale en émissions de GES.</p> <p>Le modèle fournit également une évaluation de l'impact des différents facteurs sur les résultats obtenus, en distinguant les effets de la sobriété (au niveau de l'énergie utile), de l'efficacité, des progrès technologiques et des changements de combustible ou de technologie.</p>					
Entrées	<p>Les entrées nécessaires au modèle sont de trois types:</p> <ul style="list-style-type: none"> • les données historiques, remontant dans le temps et au moins pour l'année de référence, dont il est nécessaire qu'elles soient disponibles avec la même typologie et le même niveau de désagrégation ; • les hypothèses démographiques et économiques constituant le cadrage macro-économique ; • les hypothèses d'action sur les différents leviers proposés par le modèle dans chacun des secteurs. 				
Sorties	<p>Le modèle fournit en sortie une consommation d'énergie finale, agrégée et détaillée par secteur / usage / énergie, un bilan énergétique, ainsi que différents indicateurs et intensités relatifs à l'évolution du niveau de service ou de l'efficacité, des stocks et taux d'équipements. Il fournit en complément, selon les hypothèses relatives à l'évolution de la fourniture d'énergie, une trajectoire d'émissions et un bilan GES.</p> <p>Il produit également une décomposition par levier – niveau d'activité, sobriété, efficacité, décarbonation... – de l'évolution de la consommation d'énergie et des émissions.</p>				
Détail					
Module spécifique	Modules résidentiel et tertiaire				
Périmètre technique	Bâtiments				
	L'outil EnerMED prévoit un module relatif au secteur du logement et un autre relatif au secteur des services, donc des bâtiments tertiaires. Le modèle étant par nature ouvert du point de vue du périmètre auquel il est appliqué et de la typologie qui lui est appliquée, la complétude et le niveau de détail de la couverture du parc résidentiel et tertiaire dépend de ce paramétrage.				
Usages	L'outil couvre l'ensemble des usages générant une consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels et tertiaires.				
Population	Comme indiqué pour le modèle général, les hypothèses sur la population n'entrent dans l'outil qu'au niveau de son cadrage macro. La croissance de la population et le niveau de cohabitation dans les foyers pilotent le besoin de nouveaux logements; parallèlement, l'évolution de la population active et la traduction en emplois pour le tertiaire de la croissance économique par branche pilote le besoin de nouvelles surfaces tertiaires.				
Périmètre géograph.	<table> <tr> <td>Échelle</td><td>Voir modèle général.</td></tr> <tr> <td>Territoire</td><td>Voir modèle général.</td></tr> </table>	Échelle	Voir modèle général.	Territoire	Voir modèle général.
Échelle	Voir modèle général.				
Territoire	Voir modèle général.				
Périmètre temporel	<table> <tr> <td>Horizon</td><td>Voir modèle général.</td></tr> <tr> <td>Pas temporel</td><td>Voir modèle général.</td></tr> </table>	Horizon	Voir modèle général.	Pas temporel	Voir modèle général.
Horizon	Voir modèle général.				
Pas temporel	Voir modèle général.				
Principes de calcul	<p>Les modules résidentiel et tertiaire fonctionnent selon les mêmes principes que l'ensemble de l'outil. Une demande générale de logements est d'abord construite en fonction des hypothèses démographiques; de même, une demande générale de surfaces de plancher tertiaires est construite en fonction des hypothèses démographiques et économiques.</p> <p>La spécificité du modèle est d'être flexible sur les catégories et sur le niveau de désagrégation retenus. Pour le résidentiel, l'unité fonctionnelle est le logement. Le modèle peut intégrer jusqu'à 10 types de logements et 10 classes de performance énergétique. Il permet donc classiquement de distinguer maisons individuelles et logements collectifs de différentes natures, et de modéliser des changements de classe de performance énergétique au gré des actions de démolition-construction et de rénovation. L'outil intègre un modèle de stock des logements qui associe un volume (nombre d'unités) à chacune des sous-catégories ainsi formées. Différentes technologies de chauffage peuvent leur être associées. Les hypothèses de construction, de rénovation et de changement de système de chauffage sont ensuite appliquées de façon incrémentale au stock de bâtiments sous forme de matrices de passage. Pour le tertiaire, l'unité fonctionnelle est le m² de plancher de bâtiment tertiaire. Le modèle peut prendre en compte jusqu'à 10 sous-secteurs afin de différencier les évolutions, en leur appliquant comme pour le résidentiel une transformation matricielle à chaque étape de simulation.</p> <p>L'outil permet de modéliser six usages (par exemple chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, cuisson et électricité spécifique), et de prendre en compte jusqu'à dix catégories d'équipements, que ce soit dans le résidentiel ou dans le tertiaire.</p> <p>Le calcul passe par une expression en énergie utile associée aux différents services rendus. Celle-ci est calibrée pour l'année de référence en lien avec la consommation constatée d'énergie finale et les hypothèses sur l'efficacité des appareils. Le modèle repose ensuite sur une évolution annuelle de cette demande en énergie utile, retraduite chaque année (ou à chaque pas de temps) en énergie finale en appliquant les hypothèses d'évolution des technologies et de leur efficacité.</p>				
Entrées	Les données nécessaires, outre le cadrage économique et démographique, portent sur les données historiques et les hypothèses d'évolution : le rythme de construction ou de réhabilitation, le taux de rénovation thermique et son degré de performance, l'évolution du taux d'équipements et son efficacité, la part des différentes technologies, etc.				
Sorties	Les sorties sont les mêmes que celles du modèle général, spécifiquement appliquées aux secteurs résidentiel et tertiaire.				
Éléments de discussion					
Points forts	L'originalité du modèle EnerMED est d'être flexible, c'est-à-dire de pouvoir être appliqué, sur la base d'une même structure, à différentes typologies et à différents niveaux de désagrégation des secteurs, dont le bâtiment, afin de s'adapter aux besoins des utilisateurs ou aux contraintes de disponibilité de données.				

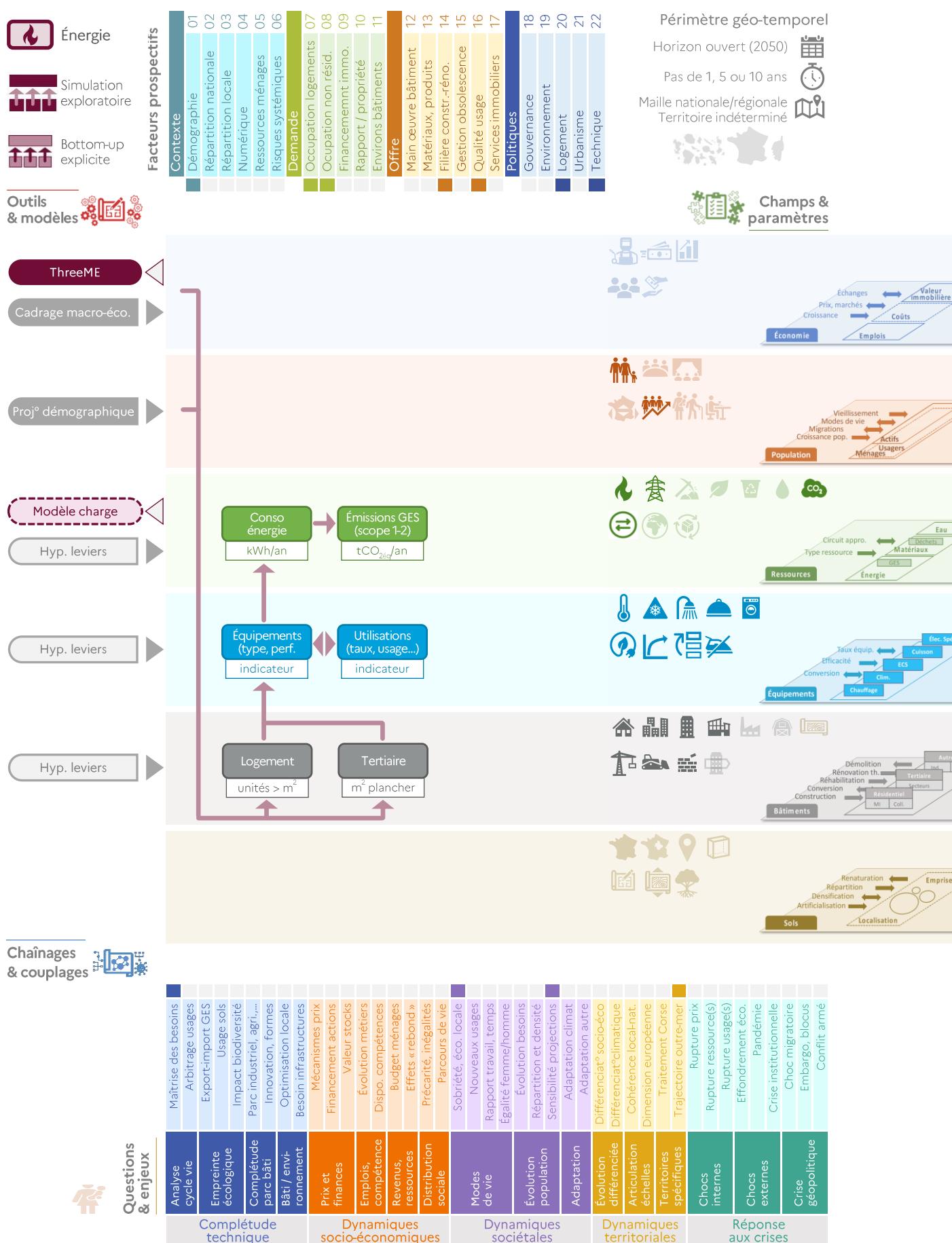
	<p>Il permet d'évaluer l'effet de plusieurs facteurs sur la demande d'énergie pour chaque utilisation finale, en distinguant les politiques de sobriété et d'efficacité, l'effet des changements de vecteur énergétique et celui des technologies. En particulier, son passage spécifique, systématique et explicite par une expression des besoins en termes d'énergie utile permet de se rapprocher d'une description des services énergétiques, donc de représenter distinctement un levier de sobriété.</p>
Questionnements et développements	<p>Pour le chauffage, le modèle intègre la possibilité de paramétriser les taux d'équipement ou d'utiliser un modèle de stock, mais seulement le taux d'équipement pour les autres usages.</p> <p>L'outil ne permet pas de modéliser finement l'évolution des bâtiments en lien avec le changement climatique, qu'il s'agisse de modification des besoins thermiques ou d'adaptation. Il intègre néanmoins dans son paramétrage un indice d'évolution du besoin en termes de chauffage et de climatisation qui est en fait calé sur l'application des différents scénarios RCP (pour <i>representative concentration pathways</i>) du GIEC.</p> <p>Les émissions de GES sont la seule externalité directement évaluée, sur le périmètre du scope 1 d'une part et du scope 2 d'autre part. La description détaillée et technico-explicite des trajectoires permet d'envisager des analyses sur d'autres enjeux tels que les besoins en matériaux, l'eau ou la pollution atmosphérique, mais plutôt en post-production que dans le cadre de la modélisation elle-même.</p> <p>Par ailleurs, le modèle ne travaille pas spécifiquement sur les aspects socio-économiques. Il ne prévoit par exemple pas de caractériser le revenu des ménages, même si ceci est en principe possible dans le choix de décomposition du parc de logements. Plus largement, il ne traite pas la question des coûts et des prix, même si cela est envisageable également en post-production ou en utilisant des modèles complémentaires comme EnerNEO ou POLES. Comme pour les externalités, ces enjeux socio-économiques sont plutôt destinés à un traitement post-production.</p> <p>Enfin, l'outil EnerMED ne prévoit pas de couplage intersectoriel, permettant par exemple de traiter un enjeu comme celui du télétravail. Les liens entre les secteurs peuvent toutefois être établis manuellement grâce à la description explicite des stocks, des usages et des actions.</p>

Besoins identifiés	Données	—
	Méthode	—

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil énergie de simulation exploratoire à visée prospective, permettant une description bottom-up, explicite et flexible de l'ensemble des consommations d'énergie, inclus le résidentiel et le tertiaire. Il couvre tous les usages et s'applique à tout territoire de niveau national ou régional, avec un pas de temps d'un à dix ans et un horizon ouvert, fixé par défaut à 2050.
	Champs et paramètres	<p>Le modèle fait pour l'essentiel porter son effort descriptif, centré sur la représentation technique, sur les trois niveaux matériels associés à la consommation d'énergie des bâtiments :</p> <ul style="list-style-type: none"> • le stock de bâtiments lui-même, avec respectivement le logement et l'unité de surface de plancher tertiaire comme principales unités fonctionnelles; • le niveau des équipements, où il n'utilise pas un modèle de stock (à part pour le chauffage) mais s'appuie sur une description du taux, de la technologie et des performances des équipements d'une part, et de leurs conditions d'utilisation d'autre part; • la dimension des ressources, où il s'intéresse pour l'essentiel à l'énergie consommée, et calcule avec des hypothèses sur le mix énergétique les émissions de GES. <p>L'outil intègre également pour son cadrage des éléments relatifs aux dimensions population et économie, mais ne développe pas de description spécifique dans ces dimensions.</p>
	Chaînages et bouclages	<p>Le modèle EnerMED vise plutôt une utilisation autoportante dans le cadre d'un service fourni aux utilisateurs, et n'est à ce titre pas conçu comme un élément d'une chaîne d'outils. Il se prête toutefois, pour une modélisation plus spécifique des enjeux liés à la demande électrique, à un chaînage avec un modèle de courbes de charge développé par Enerdata.</p> <p>L'outil peut également être connecté, grâce à son approche bottom-up explicite et à sa flexibilité en termes de désagrégation, avec des macro-modèles tels que ThreeME pour des calculs d'investissements ou d'emplois par exemple.</p>
	Questions et enjeux	<p>Très centré sur les enjeux énergie / CO₂ qui ont dominé l'évolution de la prospective du secteur bâtiment depuis de nombreuses années.</p> <p>On peut toutefois le rapprocher directement, par son parti pris singulier de travailler en énergie utile, de l'enjeu de bonne représentation de la sobriété, et par extension d'un questionnement sur l'évolution des besoins. De par sa capacité à quantifier la part respective des différents leviers dans les différents secteurs, il peut contribuer à éclairer la question des arbitrages entre usages.</p> <p>Sa modélisation simple se prête également à une approche sur la sensibilité des trajectoires aux évolutions de la population.</p> <p>Enfin, même s'il n'est pas spécifiquement destiné à cet usage, on peut noter que le caractère ouvert des choix de paramétrage pourrait rendre cet outil utile pour approcher, avec un découpage en catégories et un niveau de détail des données adaptés, la modélisation de trajectoires pour les territoires d'outre-mer.</p>

EnerMED (Enerdata)



A30. Enerter (Énergies Demain)

Outil		
Modèle / outil	Enerter	<i>Ce modèle regroupe une suite d'outils permettant, par la combinaison d'approches d'agrégation et de désagrégation, de reconstituer la consommation d'énergie d'un territoire à la maille du bâtiment.</i>
Porteur(s)	Énergies Demain	
Développeur(s)	Énergies Demain	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Emmanuel FERNANDEZ Directeur associé en charge de la modélisation - Énergies Demain Romain SOUCHU Chef de projets modélisation de consommations énergétiques - Énergies Demain	emmanuel.fernandez@energies-demain.com romain.souchu@energies-demain.com
Prise d'information	Entretien conduit le 29/03/2023. Compléments apportés par les auteurs le 09/10/2023. Fiche validée le 09/10/2024.	
Ressources	https://energies-demain.com/enerter-bati/ http://www.siterre.fr/	
Modèle général		
Finalité	Enerter est une suite de plusieurs modules constituant un outil cartographique permettant, sur la base d'une reconstitution du parc bâti résidentiel et tertiaire, de modéliser finement la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle d'un territoire. Elle permet également d'appréhender les phénomènes de précarité énergétique, et d'intégrer des enjeux liés à la mobilité. Elle vise à proposer une vision statistiquement représentative du parc bâti pour permettre de chiffrer les enjeux associés aux différentes mailles territoriales. Le diagnostic complet du parc bâti peut alimenter l'élaboration de documents stratégiques, l'évaluation d'enjeux de politiques publiques, ou encore le ciblage d'actions opérationnelles.	
Type d'outil	Il s'agit essentiellement d'un outil de simulation statique, reconstituant à partir d'une caractérisation technique et socio-économique extrêmement désagrégée et localisée, à l'échelle territoriale choisie, les consommations d'énergie des occupants des bâtiments et les dépenses associées. Il est également utilisé à des fins prospectives en simulant l'impact économique et énergétique de bouquets de travaux, ou d'évolution des prix de l'énergie.	
Champ de modélisation	La suite Enerter porte, hormis un module relatif à la mobilité, sur les consommations d'énergie du parc de bâtiments résidentiels et tertiaires à l'échelle des territoires. Elle s'inscrit dans un ensemble d'outils dans lesquels Énergies Demain distingue des outils statiques avec différentes granularités, de la maille nationale avec cet outil à la maille cadastrale, et des outils prospectifs s'appuyant sur les précédents.	
Usage type / périodicité	Le modèle sert essentiellement à la réalisation de bilans des consommations du secteur des bâtiments dans le cadre de diagnostics énergie-climat, en vue d'informer les documents de planification énergétique ou les stratégies d'action des propriétaires ou gestionnaires de parc. Il est notamment adapté pour l'aide à la décision sur des stratégies territoriales, à l'échelle des Plans climat air énergie territoriaux (PCAET) par exemple, mais peut s'appliquer jusqu'à la maille nationale.	
Architecture	La suite Enerter se décline en plusieurs modules articulés entre eux : Résidentiel, qui concerne les consommations énergétiques du parc de logements, Résidentiel-gisements, qui propose trois scénarios de rénovation, Tertiaire, qui présente les consommations du parc tertiaire, Précarité, qui traite les enjeux de précarité énergétique, et Mobilité, qui modélise les consommations liées aux déplacements. Les modules Enerter sont mis à disposition via une interface web grâce à l'outil de visualisation Siterre.	
Rythme d'actualisation	Le développement des outils de cette suite a commencé en 2009. Elle a progressivement été enrichie par les différents modules, qui font eux-mêmes l'objet d'un développement continu, et peuvent au fil du temps s'appuyer sur des bases de données publiques de plus en plus nombreuses et complètes. Annuellement, Énergies Demain propose une mise à jour des modèles Enerter sur les points suivants : données de consommation énergétique réelle, des couts de l'énergie, revenus des ménages, aides disponibles.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires, répertoriés à la maille du bâtiment et regroupés à l'échelle des unités géographiques IRIS.
	Usages	La modélisation de la consommation d'énergie intègre l'ensemble des usages (réglementaires et électricité spécifique) dans les différents types de logements et en dehors des process dans les différentes catégories de locaux tertiaires.
	Population	Le socle de modélisation est le recensement général de la population. A ce titre l'ensemble de la population est pris en compte dans la modélisation, de manière statique. La composition de chaque ménage est décrite par les variables du recensement général de la population. Chaque individu, agrégé à l'échelle du ménage se voit attribuer des revenus d'activité, ainsi que des besoins de mobilité.
Périmètre géograph.	Échelle	La suite Enerter représente le parc bâti avec une résolution à la maille du bâtiment. Elle permet de travailler à toute échelle territoriale, de la maille IRIS à la France continentale.
	Territoire	Les données nécessaires à l'outil sont disponibles à toute échelle sur le périmètre de la France continentale. Des développements sont en cours pour s'ouvrir aux territoires d'outre-mer.
Périmètre temporel	Horizon	Cet outil ne propose pas une projection, mais une simulation de l'état des lieux, son horizon est donc la situation actuelle. Une modélisation des bouquets de travaux de rénovation énergétique possibles sur chaque logement, et la possibilité de simuler différents tarifs de l'énergie permet néanmoins certaines projections.
Pas temporel	La simulation est calculée sur une année pleine.	
Principes de calcul	La série Enerter reconstitue les consommations énergétiques à l'aide des données descriptives publiques de l'INSEE. La modélisation est réalisée à l'échelle du logement ou du local, et présentée à la maille de l'IRIS.	

Le module **Résidentiel** modélise l'ensemble des consommations énergétiques du parc de logements, résidences principales et secondaires incluses. Il peut s'appliquer aux consommations dans l'état actuel du parc, ou attendues après mise en œuvre de travaux de réhabilitation.

Cet outil repose, plutôt qu'une méthode statistique, sur une logique de reconstitution « bottom-up » à partir d'une description physique des logements.

La construction du modèle s'articule autour de trois étapes principales :

- une description initiale du parc à l'échelle du logement, sur la base des recensements de l'INSEE ;
- une caractérisation des logements, du point de vue bâti et systèmes, obtenue en croisant les données précédentes avec d'autres sources (enquêtes et expertises). Celui-ci intègre d'une part une description technico-architecturale des logements à leur date de construction, et des travaux de rénovation thermique réalisés jusqu'à la période actuelle, et d'autre part une qualification des systèmes de chauffage principal, et le cas échéant d'appoint, ainsi que de ventilation ;
- une simulation thermique selon la méthode 3CL-2021, à l'échelle du logement, permettant d'estimer les consommations d'énergie.

Ainsi, le modèle caractérise et associe pour chaque logement les modes constructifs et architecturaux, les qualités thermiques des logements, les étiquettes DPE énergie et climat (méthode 3CL-2021) et les consommations conventionnelles et réelles par usage. Cette modélisation menée par usage et par énergie couvre le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS), la climatisation, et l'électricité spécifique. Pour cette dernière, la modélisation entre dans un certain niveau de détail en décrivant les besoins par usage (en fonction de l'intensité d'usage, du taux de pénétration d'usage) et la puissance appelée.

Le module **Résidentiel-gisement** propose la simulation de trois bouquets de rénovation énergétique pour l'ensemble des bâtiments résidentiels. Il vise à estimer les impacts énergétiques de la rénovation, ainsi que l'économie sur les factures, les coûts d'investissements liés, et l'efficience de l'investissement. La simulation de la consommation repose sur la méthode 3CL-2021. Ce module s'écarte donc de la logique de représentation statique des consommations du parc développée par [Enerter](#) pour proposer une projection correspondant à différentes stratégies.

Les trois bouquets de rénovation thermique applicables pour l'ensemble du parc correspondent respectivement à un scénario de travaux modestes (Sortie de passoire), de travaux dits performants (BBC Première étape), et de travaux au niveau BBC (BBC global). Chaque simulation présente les économies d'énergie, le coût global des travaux, le gain sur facture, et pour finir les emplois (en ETP) nécessaires à la réalisation des travaux.

Le module **Tertiaire** modélise, à la maille communale, l'ensemble des consommations d'énergie du parc de locaux tertiaires, par usage et par branche (catégorie d'activité). Il s'appuie sur différentes bases de données publiques (fichiers SIREN, bases sectorielles, base OpenStreetMap, etc.) pour établir une caractérisation du parc tenant compte de la branche d'activité (et du code NAF) et de la nature de l'occupant (public/privé, bloc communal, département, région, État, para public...). Bien que la granularité de modélisation ne soit pas celle de son [outil cadastral](#), la démarche repose sur une caractérisation à l'échelle du bâtiment, à l'adresse, agrégée à une maille statistique en veillant à une cohérence à la fois du point de vue du nombre d'établissements par territoire et de la répartition de la consommation en vecteurs énergétiques. Cela permet de calculer des consommations d'énergie, réparties par énergie et par usage. Le modèle prend aussi en compte, en fonction de la branche d'activité et de la nature de l'occupant (public à différents niveaux territoriaux, parapublic ou privé) à l'échelle cadastrale, l'assujettissement au décret tertiaire.

Le module **Mobilité** apporte en complément une description des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre liées à la mobilité des ménages par motif et profil de déplacement.

Le module **Précarité** développe une modélisation des revenus par individu, sur la base des données de recensement (âge, catégorie socio-professionnelle, genre, ancienneté, etc.). Ces revenus sont ensuite agrégés à l'échelle des ménages et recalés par rapport aux données de l'Insee et de la DGFiP sur la distribution des revenus au niveau de chaque territoire, au niveau communal. Ces revenus des ménages sont comparés aux dépenses d'énergie dans le logement, aux dépenses d'énergie plus largement, avec une modélisation des loyers, charges, remboursements, jusqu'à un calcul de reste à vivre sur un spectre encore plus large de dépenses, basé sur les statistiques de budget des ménages et permettant de prendre en compte les dépenses incompressibles (alimentation, numérique, assurance...). Ainsi, la modélisation permet d'analyser le niveau de précarité, ou de vulnérabilité des ménages.

Il fournit également d'autres indicateurs relatifs à la situation des ménages, en lien avec l'enjeu de précarité, tels que les déciles de revenus, leur éligibilité aux seuils ANAH (dispositif MaPrimeRenov), la situation relative au seuil de pauvreté, ou le taux d'effort énergétique (TEE). La suite [Enerter](#) fournit enfin, au travers de ces éléments, une évaluation du gisement disponible d'économies d'énergie.

Entrées

La suite [Enerter](#) repose en particulier, pour les modules associés au résidentiel, sur une base de données développée par Energies Demain pour regrouper un maximum d'informations sur les ménages et les logements qu'ils occupent. Celle-ci s'appuie sur le croisement des deux recensements détaillés publiés chaque année par l'INSEE et portant respectivement sur les logements (avec une cinquantaine de caractéristiques) et sur les individus (avec une centaine de caractéristiques).

Globalement, pour le résidentiel, la démarche revient donc à construire une base de données décrivant les logements en France et les ménages occupants, en croisant deux grandes catégories de données :

- des données socio-économiques, relatives aux revenus des ménages (salaires, aides, revenus patrimoniaux, aides sociales, impôts...) et à leurs dépenses (loyer ou remboursement, etc.),
- des données énergétiques, relatives aux logements (consommation d'énergie, typologies de logements, typologies de systèmes, typologie d'usagers, énergie de chauffage...) et à l'énergie elle-même (prix), ainsi que pour le module correspondant à la mobilité (profils de déplacement décrits par motif, etc.).

Le modèle opère différemment pour le tertiaire, en agrégeant la modélisation des consommations et du parc de bâtiments réalisé à l'échelle cadastrale.

Outre ces entrées, il intègre également d'autres données, liées par exemple aux politiques publiques mises en œuvre ou envisagées, à des coûts d'investissement et d'exploitation, ou encore, au-delà du strict périmètre bâtimentaire, aux motifs de déplacements et distances parcourues.

Sorties	<p>À partir des données de description initiale et de caractérisation du parc, des données relatives aux ménages, et des données de cadrage des consommations, le module résidentiel calcule des consommations énergétiques conventionnelles. Il permet ensuite, avec des données sur les facteurs d'émission de gaz à effet de serre et sur les prix des énergies, de convertir ces résultats en énergie en termes d'émissions de gaz à effet de serre comme de dépenses énergétiques. De la même manière, le modèle fournit une simulation des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre associées au secteur tertiaire.</p> <p>Le modèle Enerter Précarité offre des indicateurs complémentaires sur les revenus des ménages, les aides auxquels ils sont éligibles, leurs dépenses, ainsi que les indicateurs tels que la dépense d'énergie et le TEE pour chaque ménage recensé.</p> <p>L'ensemble de ces données sont accessibles au format brut, ou à travers un outil web de visualisation cartographique : Siterre. Cet outil permet, à côté de l'extraction directe des données au périmètre territorial ou thématique choisi, d'en faire une interrogation en dynamique à travers différents filtres et de les visualiser en agrégé</p>
Éléments de discussion	
Points forts	<p>Le modèle Enerter s'attache à une reconstitution statique, par une simulation détaillée, d'un état des lieux complet et calculable des consommations d'énergie du parc résidentiel et tertiaire sur un territoire, fournissant une base précieuse pour la construction de projections à travers différents scénarios.</p>
Questionnements et développements	<p>Si l'exactitude des résultats n'est pas l'objectif recherché dans cet exercice de modélisation qui cherche avant tout à décrire les mécanismes de consommations, la cohérence du modèle avec les consommations observées est assurée par une comparaison avec les données de consommations officielles à l'échelle de la région et un recalage à la maille IRIS sur la base des données des fournisseurs d'énergie (électricité et gaz).</p> <p>Dans le module Résidentiel-gisement, l'application des bouquets de rénovation thermique n'est croisée avec des changements d'énergie que de manière statique lors de l'initialisation. Ces changements d'énergies sont réalisés pour prendre en compte la décarbonation nécessaire au bouquet BBC. Bien que ce module ait une dimension projective, il s'inscrit dans le cadre d'Enerter dans la logique d'une photographie de la situation, à laquelle il apporte une évaluation des gisements potentiels de réduction des consommations par la rénovation. La mise en œuvre de cette rénovation, qui implique d'envisager également l'évolution des systèmes de chauffage, est plutôt traitée dans les outils prospectifs comme Prosper.</p> <p>L'extension des outils Enerter aux territoires d'outre-mer est en cours, mais elle est difficile. En principe, la démarche de modélisation retenue peut tout à fait s'y appliquer. Mais d'une part, on ne dispose généralement pas dans ces territoires du même niveau de finesse sur les différentes variables de recensement du parc ou de la population. D'autre part, il est plus compliqué de calculer une consommation d'énergie sur la part des données collectées, dans la mesure où la méthode 3CL ne s'applique pas.</p>
Besoins identifiés	<p>Données</p> <p>Un angle mort de la modélisation concerne la rénovation passée. On dispose d'insuffisamment d'information sur les rénovations thermiques réalisées, par nature de façon diffuse, et sur leur impact sur les performances. Il n'y a pas de base de données qui puisse permettre de construire facilement une vision quantifiée des rénovations passées, que ce soit en nombre ou en qualité, d'autant plus quand il s'agit de la territorialiser.</p>
Méthode	—
Positionnement dans la cartographie	
 Outils et modèles	<p>La suite de modules Enerter compose un modèle de simulation statique de la consommation d'énergie du parc de bâtiments, au périmètre d'un territoire partout en France métropolitaine. La modélisation procède par reconstitution des consommations à partir d'une caractérisation explicite à la maille IRIS, avec une démarche bottom-up croisant une description physique et socio-économique pour le résidentiel, et une démarche de d'agrégation de la donnée cadastrale vers une échelle IRIS, par branche pour le tertiaire.</p>
 Champs et paramètres	<p>Cet outil se concentre naturellement sur la dimension bâtiments, dont il décrit les unités sous forme de surfaces répondant à différents types en fonction de leurs modes constructifs et architecturaux. Il investit également la dimension des équipements, avec plus ou moins de détail explicite sur le nombre, le type et la performance selon qu'il traite des systèmes de chauffage, d'eau chaude sanitaire ou d'équipements diffus, dans le résidentiel ou le tertiaire. Il couvre par continuité, au niveau des ressources, les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre qui leur sont associées. Il ne développe en revanche de description explicite ni dans la dimension population ni dans la dimension économie, même si la première entre pleinement dans la modélisation via des indicateurs sur le nombre de ménages ou d'actifs par branche tertiaire, quand la seconde est abordée via des questions de prix de l'énergie, de revenus en lien avec les enjeux de précarité, ou encore de volume d'activité dans le tertiaire.</p>
 Chaînages et bouclages	<p>En tant qu'outil, Enerter est lui-même constitué par l'articulation de plusieurs modules couvrant les différents volets de son champ d'application, mais forme un modèle autonome. Conçu pour fonctionner comme outil de diagnostic, il peut également fournir l'état des lieux initial nécessaire à une évaluation prospective : c'est ainsi qu'il est chaîné avec l'outil Prosper, qui propose à la même maille territoriale une simulation dynamique de l'évolution des consommations d'énergie et enjeux associés.</p>
 Questions et enjeux	<p>En tant qu'outil de simulation statique, ce modèle n'a pas vocation a priori à intégrer des enjeux prospectifs. Toutefois, il pourrait favoriser l'intégration de certains d'entre eux à l'étape du diagnostic, de par sa construction à la maille locale. Cela est déjà le cas sur la précarité et la prise en compte des écarts de revenu, dans le champ des dynamiques socio-économiques. La logique de modélisation à laquelle il obéit semble par exemple ouverte à une prise en compte de quelques enjeux relatifs à la complétude technique, comme l'usage des sols, et la maille à laquelle il s'applique peut s'articuler avec les enjeux de différenciation territoriale, mais il semble limité dans ce domaine, et encore moins à même d'intégrer des enjeux se rapportant aux dynamiques sociétales ou à la réponse aux crises.</p>

A31. Outil cadastral (Énergies Demain)

Outil		
Modèle / outil	Outil cadastral (pas de nom)	Cet outil vise à reconstituer, par simulation, la consommation d'énergie individuelle de bâtiments, afin de fournir un diagnostic détaillé avant de projeter l'évolution possible à l'échelle d'un territoire.
Porteur(s)	Énergies Demain	
Développeur(s)	Énergies Demain	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Emmanuel FERNANDEZ Directeur associé en charge de la modélisation - Énergies Demain Romain SOUCHU Chef de projets modélisation de consommations énergétiques- Énergies Demain	emmanuel.fernandez@energies-demain.com romain.souchu@energies-demain.com
Prise d'information	Entretien conduit le 29/03/2023. Fiche validée le 09/10/2024.	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	Le terme d' <i>outil cadastral</i> englobe différents modules, traitant du parc résidentiel et du parc tertiaire, travaillant à l'échelle cadastrale au sens de l'empreinte physique des bâtiments. Comme la suite <i>Enerter</i> , cette démarche à une vocation de caractérisation des situations et des potentiels en termes de consommation d'énergie et d'enjeux associés, pouvant être par ailleurs le support d'applications prospectives modélisant d'autres outils, mais elle correspond à un cas d'usage et des besoins différents. Là où le premier peut servir une stratégie territoriale, de l'échelle du PCAET jusqu'au niveau national, cette approche cadastrale est plus destinée à s'adapter à des cas d'usages locaux, comme la mise à disposition d'une collectivité ou d'un bailleur public ou privé d'une stratégie de rénovation ciblée du parc bâti.	
Type d'outil	L'outil cadastral réalise une simulation statique, reconstituant à partir d'une caractérisation technique et socio-économique extrêmement désagréguée et localisée, les consommations d'énergie à l'échelle cadastrale.	
Champ de modélisation	Cette modélisation porte sur l'état des lieux des consommations d'énergie du parc de bâtiments résidentiels et tertiaires, tous usages inclus.	
Usage type / périodicité	L'outil est développé pour les besoins d'Énergies Demain et de différentes collectivités, pour des usages potentiellement divers, et sans périodicité particulière.	
Architecture	La démarche couverte par la dénomination outil cadastral développe pour l'essentiel, à une échelle la plus désagréguée possible, une approche de modélisation semblable à celle d'Enerter, avec des modules consacrés au résidentiel et au tertiaire. Dans chaque module, la simulation des consommations d'énergie est le produit d'un calcul faisant appel à différentes couches, depuis la description physique et localisée à l'adresse des bâtiments à la nature et aux caractéristiques de leurs occupants, puis à l'utilisation de profils de consommation d'énergie correspondants.	
Rythme d'actualisation	Les utilisations que recouvre cette démarche d'outil cadastral se font au cas par cas. Le rythme d'actualisation est annuel.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires, répertoriés à la maille du bâtiment sur le territoire d'application.
	Usages	La modélisation de la consommation d'énergie intègre l'ensemble des usages dans les différents types de bâtiments.
	Population	La population n'est pas modélisée en tant que telle, même si l'outil peut passer par une caractérisation des occupants et de leur nombre, qu'il s'agisse de logements ou d'activités tertiaires.
Périmètre géograph.	Échelle	L'échelle de calcul de l'outil est celle du local situé dans le bâtiment, rapporté à une adresse, puis du territoire choisi sur lequel les résultats par bâtiment sont agrégés.
	Territoire	La démarche peut s'appliquer à tout territoire où les données sont suffisamment disponibles et les conditions suffisamment proches de celles retenues pour les calculs représentatifs, ce qui s'applique potentiellement à l'ensemble de la France métropolitaine.
Périmètre temporel	Horizon	Cet outil ne propose pas une projection, mais une simulation de l'état des lieux, son horizon est donc la situation actuelle.
	Pas temporel	La simulation est calculée sur une année pleine.
Principes de calcul	La première étape de la modélisation est la description de tous les objets bâtiment du territoire couvert, en termes morphologiques. L'outil va traiter les données telles que celle de la BD Topo, d'OpenStreetMap, les données du cadastre numériser pour obtenir une vision la plus exhaustive possible des bâtiments sur le territoire considéré. Différents traitements sont appliqués pour tenir compte des mitoyennetés, des hauteurs et des volumes, de la densité (coefficients d'occupation des sols), etc. L'une des principales clés de cette modélisation est de rattacher une adresse à un bâtiment. Ainsi, une fois les bâtiments décrits de manière physique, la démarche consiste à croiser cette donnée avec leur occupation: quel type d'occupant trouve-t-on dans quel bâtiment, à quel niveau, etc. Pour obtenir cette vision, de nombreuses bases de données sont sollicitées. Par exemple, pour le tertiaire, des bases telles que la base SIREN, mais aussi des bases sectorielles plus ou moins larges comme celles des administrations, des équipements sportifs, des EPHAD, des établissements de l'Éducation nationale, des musées etc. viennent compléter l'information. Ces données sont généralement disponibles à l'adresse, d'où l'importance d'être capable de les relier physiquement aux bâtiments. Ensuite, on ajoute une couche d'information relative à l'environnement énergétique du bâtiment. Cela prend par exemple en compte l'identification des bâtiments raccordés à un réseau de chaleur, et celle des bâtiments raccordés au gaz là où l'implantation du réseau de distribution est disponible en open data (i.e. sur le territoire desservi par GRDF). Les données ouvertes des distributeurs d'électricité et de gaz sur les volumes de consommations sont intégrées, de même que les données sur le diagnostic de	

<p>performance énergétique (DPE), et plus largement les données de la Base de données nationale du bâtiment (BDNB) du CSTB.</p> <p>L'ensemble de ces éléments permettent enfin de calculer une consommation d'énergie à la maille bâti mentaire. La méthode repose sur le calcul de profils de consommation par typologie constructive et par affectation.</p> <p>La modélisation comprend, sur la base des données de caractérisation physique, une description de la forme et du découpage interne de chaque bâtiment, qui est croisée avec des paramètres d'occupation couvrant, de façon adaptée respectivement aux usages résidentiels et tertiaires, des paramètres descriptifs de la nature et du nombre des occupants et de l'intensité d'occupation. Le niveau de performance énergétique des bâtiments est également pris en compte, via un descriptif de l'enveloppe et des gestes de consommation.</p> <p>Pour le tertiaire, Energies Demain a développé depuis 2010 une bibliothèque de profils de consommation selon une typologie de critères architecturaux et occupationnels du tertiaire, conduisant à distinguer une centaine de profils environ (par exemple, l'hôpital d'avant 1919, avec ses matériaux caractéristiques, éventuellement modifiés s'il a fait l'objet d'une rénovation, etc.). La variation du climat selon les régions est également prise en compte.</p> <p>Ainsi, chaque local se voit affecter un profil de consommation correspondant à sa catégorie, qui est à son tour déformé pour tenir compte de ses éventuelles spécificités avant d'obtenir une courbe de consommation.</p> <p>Pour le résidentiel, les données ouvertes ne sont pas suffisamment désagrégées pour permettre directement une caractérisation à l'échelle de l'adresse. Celle-ci est donc obtenue par une démarche top-down à partir de la plus petite échelle à laquelle les données sont disponibles, c'est-à-dire à la maille IRIS. La consommation observée à cette maille est désagrégée à l'adresse selon une règle de distribution tenant compte des caractéristiques des bâtiments résidentiels et de différents critères de construction ou d'occupation. Un calcul par la méthode 3CL-2021 permet en fine de simuler des étiquettes énergétiques et des déperditions à la maille du bâtiment résidentiel avec son adresse.</p>		
Entrées	L'ensemble de la démarche s'appuie sur l'intégration de nombreuses bases de données, toutes en open data, telle que décrit dans les principes de calcul.	
Sorties	L'outil fournit une simulation de la consommation d'énergie annuelle de chaque bâtiment, et son agrégation jusqu'à l'échelle du territoire représenté.	
Éléments de discussion		
Points forts	La méthode repose essentiellement, comme toutes les démarches appliquées à cette échelle, sur du croisement de données, mais la plus-value de cet outil réside dans la description de l'état thermique et énergétique du bâtiment, qui capitalise sur de nombreux développements réalisés depuis sa création par Energies Demain, comme Enerter ou la bibliothèque de profils de consommation du tertiaire.	
Questionnements et développements	<p>L'étape clé de cette démarche de modélisation à l'échelle cadastrale, qui consiste à rattacher précisément un bâtiment décrit par son empreinte et ses caractéristiques diverses à une adresse, n'est pas si simple qu'il n'y paraît. Des travaux sont en cours avec le CSTB, l'ADEME notamment pour progresser sur ce point.</p> <p>Un des enjeux, à l'inverse, est de déterminer à quel point les outils développés selon la même philosophie, à la maille territoriale avec Enerter et à la maille de l'adresse avec l'outil cadastral se « parlent », c'est-à-dire de savoir si les données utilisées aux deux échelles présentent une continuité. Malheureusement, elles ne sont aujourd'hui pas toujours cohérentes entre elles. Par exemple, les données des fichiers fonciers ne recoupent pas complètement les données Insee. Les deux échelles ont du mal à se parler parce que les données source sont construites de manière très différente.</p> <p>Vis-à-vis des enjeux de consommation en puissance, globalement, l'outil simule les consommations d'énergie sur une période annuelle. Il ne calcule pas de façon systématique de courbe de charge, mais permet quand même un passage en calcul horaire sur certains points, autour de « verticales d'usage » pour des besoins spécifiques. Ce type d'application a par exemple été développé pour l'application de l'outil au cadastre solaire, qui évalue des taux d'auto-consommation en production solaire, y compris une déclinaison relative à l'appareillage des bâtiments pour optimiser les groupements d'auto-consommation collective (modèle ATAC).</p>	
Besoins identifiés	Données	
	—	
	Méthode	
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	Cet outil est un modèle de simulation statique de la consommation d'énergie des bâtiments, au périmètre d'un parc bâti, pouvant s'appliquer à des bâtiments résidentiels et tertiaires partout en France métropolitaine. La modélisation procède par reconstitution des consommations à partir d'une caractérisation explicite des bâtiments à l'adresse et d'un calcul normalisé du profil énergétique tenant compte des caractéristiques physiques et d'occupation.
	Champs et paramètres	Cet outil se concentre naturellement sur la dimension bâtiments , dont il décrit les unités sous forme de volumes attachés à une adresse, eux-mêmes divisés lorsqu'ils connaissent plusieurs occupants en sous-volumes répartis entre les différents usagers. Le modèle relie cette dimension à celle des ressources en calculant pour chaque unité ainsi constituée une consommation d'énergie, qui ne passe toutefois pas par une modélisation explicite au niveau des équipements . Il ne décrit par ailleurs que de façon sommaire la population, approchée sous forme de catégories et nombres d'occupants, et n'aborde pas explicitement la dimension économie. Enfin, il intègre des données de caractérisation s'inscrivant dans la dimension des sols, avec l'empreinte en surface de chaque bâtiment considéré, mais ne l'exploite pas en tant que telle dans la modélisation.
	Chaînages et bouclages	La démarche décrite sous l'appellation socle cadastral est une démarche de diagnostic, fournissant aux gestionnaires de parc bâti un état initial. Elle est en ce sens auto-portante. Elle fournit toutefois aussi le support nécessaire pour une éventuelle projection dynamique de l'évolution du parc, mais celle-ci est opérée à la carte, et ne fait pas l'objet d'une démarche standard via un outil qui serait directement chaîné avec cette simulation statique.
	Questions et enjeux	En tant qu'outil de simulation statique, ce modèle n'a pas vocation a priori à intégrer des enjeux prospectifs. Son périmètre très local d'application en restreint également la portée sous cet angle. Il peut néanmoins permettre d'intégrer de façon fine, à l'étape du diagnostic, certaines préoccupations

pour favoriser leur prise en compte dans une étape prospective. Cela pourrait notamment être le cas dans le registre de la **complétude technique**: il pourrait par exemple, par son approche à l'adresse, améliorer la complétude du parc bâti couvert, ou encore, grâce aux données qu'il engrange sur la surface au sol des bâtiments, favoriser la prise en compte des usages des sols; en renforçant son approche des réseaux d'énergie, il pourrait également être utile sur les enjeux d'optimisation locale ou de besoins d'infrastructures. Enfin, dans un autre registre, sa maille très fine pourrait aussi permettre une caractérisation à cette échelle du parc vis-à-vis des enjeux d'adaptation.

A32. Prosper (Énergies Demain)

Outil		
Modèle / outil	Prosper Actions	
Porteur(s)	Énergies Demain le SIEL-Territoire d'énergie Loire	<i>Cet outil permet, à partir d'une simulation statique et d'un jeu d'actions précalculé, l'évaluation de scénarios de transition énergétique territoriaux, couvrant l'ensemble du résidentiel, du tertiaire et du reste de l'économie.</i>
Développeur(s)	Énergies Demain	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Lucas REMONTET Responsable Prosper Actions sur le développement et l'animation du réseau - Energies Demain Steven LE PIERRÈS Responsable Prosper Actions sur la méthodologie et l'architecture logicielle - Energies Demain Alexandre CHABERT Adjoint Pôle Transition Energétique – SIEL-TE42 Cyril CHAMBE Chargé Energie Climat Territoires – SIEL-TE42	lucas.remontet@energies-demain.com steven.lepierre@energies-demain.com chabert@siel42.fr chambe@siel42.fr
Prise d'information	Entretien conduit le 29/03/2023. Compléments apportés par les auteurs le 09/10/2023. Fiche validée le 09/10/2024.	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	Prosper Actions est un outil de prospective énergétique territoriale à destination des collectivités, essentiellement utilisé à la mairie des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI), pour de l'accompagnement sur l'élaboration de plans climat, d'études de planification énergétique et schémas directeurs des énergies (renouvelables) par exemple.	
Type d'outil	Il s'agit d'un modèle technico-explicite de projection de trajectoires de consommation et de production d'énergie à l'échelle territoriale, fondé sur la simulation d'un catalogue d'actions normalisées.	
Champ de modélisation	Le modèle couvre l'ensemble des activités économiques à l'échelle du territoire d'application, modélisant les consommations d'énergie par secteur et par usage et la production d'énergie.	
Usage type / périodicité	L'outil Prosper Actions a été développé par Énergies Demain en partenariat avec un syndicat d'énergie SIEL-Territoire d'énergie Loire, et est déployé surtout au niveau des syndicats d'énergie, qui eux-mêmes le mettent à disposition de leurs adhérents, donc de différents EPCI. Il a également été déployé au niveau de certaines métropoles, comme Rouen, Bordeaux ou encore Rennes. Il a vocation à scénariser un certain nombre d'actions, pour fournir un scénario global et cohérent, et s'appuie pour cela sur une étape de diagnostic basée sur les outils statiques de reconstitution du bilan énergétique des territoires fournis par Enerter et croisée avec les données des observatoires régionaux. Il permet sur cette base de comparer différentes stratégies possibles entre elles et avec un scénario tendanciel, fournissant notamment via son interface de résultats une analyse multicritères couvrant l'énergie, les gaz à effet de serre et polluants, les investissements et les coûts d'exploitation, la facture énergétique et les emplois. L'outil propose via une interface graphique et cartographique dynamique une visualisation directe des résultats. Il est proposé à différentes collectivités en fonction de leurs besoins, sans périodicité particulière.	
Architecture	Prosper Actions prend la forme d'une application web permettant de construire des scénarios énergétiques aux horizons 2030, 2040 et 2050. Il articule une étape de diagnostic avec une étape de scénarisation, dont il propose ensuite une analyse multicritères et une visualisation graphique et cartographique. L'outil intègre notamment : <ul style="list-style-type: none"> • la production d'un état des lieux du territoire au sens des données Climat Air Énergie, à la mairie de la commune; • un diagnostic des consommations d'énergie et des différents indicateurs associés basé sur la modélisation Enerter, croisée avec les données des observatoires régionaux • une interface de construction de scénarios basé sur un catalogue d'actions combinables à différentes échéances et de façon plus ou moins fine, et sur la modélisation de leur impact à l'échelle communale; • une interface de visualisation des résultats, permettant notamment une comparaison entre différents scénarios, ainsi qu'une représentation cartographique. 	
Rythme d'actualisation	L'actualisation de l'outil connaît un rythme variable selon les modules et les besoins. Certains éléments, comme les données de consommation et de production d'énergie sont actualisés selon le rythme de mise à disposition de nouvelles données par les observatoires régionaux. D'autres éléments, comme les entrées démographiques de références peuvent également être actualisées avec les nouvelles données issues du recensement général de la population, ou des projections fournies par l'Insee (modélisation Omphale). Mais pour l'essentiel, l'actualisation se fait plutôt au fil de l'eau et selon les besoins.	
Périmètre technique	Bâtiments Le modèle couvrant l'ensemble des activités économiques et se recalant sur les données de consommation d'énergie à l'échelle des territoires, l'ensemble des bâtiments du secteur résidentiel et tertiaire entre dans le périmètre.	
Usages		
	D'une manière générale, l'ensemble des consommations d'énergie est pris en compte, ce qui inclut tous les usages de l'énergie dans les bâtiments. Les activités de construction et de démolition de bâtiments sont par ailleurs prises en compte, mais leur consommation ou leur impact est rattaché aux secteurs de production correspondants, et n'est pas prise en compte dans les trajectoires relatives au résidentiel et au tertiaire.	

	Population	L'ensemble de la population est pris en compte dans la modélisation, à travers les hypothèses démographiques d'entrée, mais celle-ci n'est pas modélisée en tant que telle, que ce soit sous forme de ménages, d'usagers ou d'actifs.
Périmètre géograph.	Échelle	L'outil n'a pas de limite stricte en matière d'échelle couverte, mais il opère pour l'essentiel à la maille communale et sa conception vise avant tout une utilisation à l'échelle des EPCI. L'interface et la structure des bases permet toutefois d'agrégner des scénarios construits à cette échelle à des échelles plus grandes : jusqu'à l'échelle des départements pour l'interface web et jusqu'à l'échelle nationale en format base de données.
	Territoire	S'appuyant essentiellement sur Enerter pour l'étape de l'état des lieux, Prosper Actions fonctionne au même périmètre de données disponibles, c'est-à-dire celui de la France continentale.
Périmètre temporel	Horizon	Le modèle propose une projection et une visualisation aux horizons 2030, 2040 et 2050.
	Pas temporel	Les trajectoires sont construites sur la base d'une combinaison d'actions dont l'entrée en vigueur et le rythme peuvent être paramétrés selon les périodes suivantes : 2020 – 2025 ; 2025 – 2030, 2030 – 2040, 2040 – 2050.
	Principes de calcul	<p>Au premier niveau, l'outil Prosper Actions structure un état des lieux complet du territoire sur le périmètre Climat Air Énergie: les consommations d'énergie, la production d'énergies renouvelables, les émissions de gaz à effet de serre et les émissions de polluants. Toutes ces données sont fournies à la maille communale.</p> <p>Pour le résidentiel, cet état des lieux est initialisé à partir du modèle Enerter résidentiel, avec sa logique « bottom-up » de description fine des logements et de leur consommation, permettant une reconstitution des consommations énergétiques du parc résidentiel du territoire, par usage et par énergie. Ces données sont ensuite ajustées aux données par énergie de l'observatoire régional, à la maille EPCI ou communale selon les cas. Il fonctionne de la même manière avec les données fournies par Enerter pour le tertiaire. Le calcul recalé avec les données de l'observatoire distingue pour le résidentiel les maisons individuelles, immeubles en copropriété et habitats à loyer modéré(HLM), et pour le tertiaire les branches publiques (administration, enseignement, action sociale...) et le tertiaire privé, en distinguant du point de vue fonctionnel les usages liés au chauffage, à l'eau chaude sanitaire(ECS) et les autres.</p> <p>La même méthode s'applique pour les transports(mobilité et fret). Pour l'industrie et l'agriculture, la démarche est plutôt « top-down », en désagrégeant la consommation d'énergie à l'échelle communale à partir d'indicateurs de production industrielle ou agricole fournis par l'observatoire régional.</p> <p>En s'appuyant sur les orientations fournies par la Stratégie nationale bas carbone au niveau national et par le Schéma régional climat air énergie(SRCAE) de la région concernée ou d'autres études régionales, l'outil projette ensuite des évolutions dites « tendancielles » par secteur, aux jalons 2030 et 2050. Ce scénario est censé décrire la trajectoire correspondant à l'état des évolutions tendancielles et des actions déjà engagées par les pouvoirs publics, en l'absence de toute nouvelle action. Il fournit une trajectoire de consommation d'énergie détaillée par secteur, pour l'ensemble des secteurs. Ces évolutions, qu'il s'agisse de tendances démographiques ou économiques ou d'effet des politiques publiques, sont décrites à partir d'hypothèses sur un certain nombre de paramètres clé. Pour la partie bâtiment, ces paramètres sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • pour le résidentiel : (a) l'évolution du parc de logements en fonction des constructions, liées à la démographie, et des destructions, (b) l'évolution de la taille des logements neufs, (c) l'évolution des parts de marché par énergie, et (d) l'évolution de la performance énergétique des nouveaux logements et des équipements; • pour le tertiaire: (a) l'évolution des surfaces tertiaires en fonction de la démographie, (b) l'évolution des consommations unitaires des surfaces neuves, par activité et par énergie, et (c) l'évolution spécifique du taux de climatisation. <p>Le modèle permet sur cette base de calculer un scénario « utilisateur »(et même plusieurs) par différence avec le scénario tendanciel, au même périmètre, en fonction des actions que l'utilisateur choisit de projeter.</p> <p>Une base d'actions unitaires couvrant typiquement le périmètre énergétique des Plans climat air énergie territoriaux(PCAE) est ainsi proposée, le « catalogue » regroupant plus de cent cinquante actions possibles. Il s'agit notamment d'actions de maîtrise de la demande d'énergie, dont une large part s'applique dans le résidentiel et le tertiaire, d'actions de développement des énergies renouvelables, et d'actions relatives au report modal dans les transports. La base contient des éléments opérationnels sur la typologie des projets, leur description technico-économique, leurs impacts en énergie, puissance appelée et émissions de gaz à effet de serre, ainsi que des coûts d'investissement et d'exploitation associés.</p> <p>Ce calcul s'appuie sur la représentation obtenue à l'échelle IRIS grâce à Enerter mais s'effectue de façon moyennée à la maille communale. L'impact calculé est pondéré des consommations initiales. Par exemple, un paramétrage fixe un pourcentage moyen de gain de consommation d'une maison individuelle lorsqu'elle subit une rénovation de type BBC. Il y a donc un précalcul paramétré de l'impact des différentes actions, ce paramétrage étant ajustable(par le modéliste). Conformément à la méthode employée à l'étape du diagnostic, le calcul de l'impact des actions s'effectue selon une logique « bottom-up » pour le résidentiel et le tertiaire, ainsi que pour les transports, alors qu'il s'agit plutôt d'une application moyennée et pondérée en mode « top-down » pour l'industrie et l'agriculture.</p>
	Entrées	<p>Les données d'entrée nécessaires à l'outil sont d'abord, à l'étape de l'état des lieux, celles dont a besoin Enerter pour produire une simulation. Plus largement, ces données sont recroisées avec des données d'entrée fournies, au cas par cas, par les Observatoires régionaux.</p> <p>Pour la production du scénario « tendanciel », l'outil intègre des données issues des différents documents de planification, qu'il normalise sous forme d'objectifs à atteindre à différents horizons et d'actions type. Pour le calcul de scénarios d'action, Prosper Actions dispose d'un catalogue d'actions, et de données d'entrées relatives à l'impact pré-calculé de ces actions. Enfin, le modèle produit les scénarios sur la base d'un paramétrage relatif au choix des actions mobilisées, entré par l'utilisateur.</p>
	Sorties	L'outil propose en premier lieu, à l'étape du diagnostic, un état des lieux complet des consommations d'énergie, par secteur, usage et vecteur, des émissions de gaz à effet de serre énergétiques et non énergétiques, des émissions d'une série de polluants, et fournit également des éléments relatifs aux puits de séquestration du carbone d'une part, de l'évolution des besoins en termes de réseau électrique d'autre part. Ces résultats sont fournis à la maille communale.

<p>L'outil fournit ensuite, au même périmètre, des projections à 2030 et 2050 calculées selon un scénario « tendanciel » intégrant les mesures existantes, en l'absence de nouvelles, puis des projections correspondant au bouquet de mesures formant le scénario « utilisateur » choisi par l'opérateur. Ces résultats peuvent être visualisés sous différents formats, inclus des sorties graphiques ou sous forme de carte par commune selon les indicateurs choisis. L'outil fournit également, lorsqu'ils sont prédefinis, des éléments de comparaison avec les objectifs fixés par la collectivité, par exemple ceux du SRCAE, aux horizons 2030 et 2050.</p>	
<h3>Éléments de discussion</h3>	
Points forts	<p>Le recours à des actions dont les impacts sont précalculés permet de construire rapidement des scénarios, pour identifier les priorités d'action et les ordres de grandeur des opérations à mettre en œuvre, même si l'utilisation d'un catalogue de mesures et de précalculs ne permet pas à l'utilisateur de construire des scénarios plus fins.</p> <p>L'outil présente par ailleurs une dimension collaborative, dans la mesure où il prévoit une consolidation territoriale. Ainsi, il permet de concaténer différents scénarios, pour obtenir par exemple à l'échelle d'un département l'agrégation de scénarios développés par les EPCI, et disposer d'un scénario global à partir des objectifs fixés dans chacun des territoires. La même opération peut être transposée du niveau des scénarios ainsi obtenus à l'échelle des départements à celui d'une région.</p>
Questionnements et développements	<p>Par rapport à l'échelle de territorialisation, Énergies Demain a testé l'application de la méthode de modélisation <i>Prosper Actions</i> à une échelle plus fine que la maille communale, en descendant au niveau des unités IRIS, mais cela s'est avéré compliqué, et peu pertinent en termes de gain d'opérationnalité de l'outil par rapport à la complexité que cela introduirait dans son fonctionnement – même si l'amélioration continue des outils et des données accessibles permettrait peut-être de progresser dans ce domaine aujourd'hui.</p> <p>L'évolution démographique prise en compte dans le scénario tendanciel permet de paramétrier un rythme de construction neuve et de destruction de l'existant, et une évolution des surfaces par secteur tertiaire. Celle-ci s'appuie généralement sur les scénarios <i>Omphale</i> de l'Insee, en appliquant une clé de répartition à l'échelle communale.</p> <p>Concernant les réseaux, le modèle calcule un impact par différence entre scénario « tendanciel » et « utilisateur » du point de vue de l'évolution de la consommation et de la production à la maille des postes source du réseau électrique. Ce calcul est obtenu par en rapprochant une répartition statistique sur le territoire des évolutions moyennes en consommation et production de la localisation des postes, au prorata de la situation actuelle.</p> <p>Il n'y a pas à ce stade de modélisation intégrée du stockage de l'énergie.</p> <p>On peut noter que concernant la mobilité et son lien avec l'implantation du bâti, l'outil <i>Prosper Actions</i> introduit une double approche : la comptabilité cadastrale, qui est celle des observatoires, et recouvre l'ensemble des déplacements intervenant sur le territoire, sans comptabiliser la part hors territoire de déplacements qui y entrent ou en sortent, et une comptabilité « responsabilité », qui prend en compte l'ensemble des distances parcourues en lien avec les flux internes au territoire et ses échanges avec les autres territoires, permettant de mieux caractériser les déplacements générés (motifs, classes de distance, etc.). Cela peut présenter un intérêt pour prendre en compte un levier comme le télétravail. La réduction des distances parcourues globales fait à ce sujet partie des leviers qui peuvent être paramétrés via le catalogue d'actions disponibles dans l'outil.</p> <p>Par ailleurs, lorsqu'une hypothèse, comme celle du télétravail, introduit un enjeu de couplage – par exemple entre surfaces de résidentiel et tertiaire et distances pendulaires parcourues –, l'architecture du modèle ne vise pas à réaliser ce couplage automatiquement, mais permet de l'introduire de façon manuelle.</p> <p>Toutefois, une des limites de l'outil est que l'impact des actions étant précalculé pour chacune d'elles, il n'intègre pas d'évaluation de l'impact combiné de différentes actions. En première approche cela paraît satisfaisant, mais plus on pousse les curseurs des actions, plus les interactions entre elles deviennent importantes, et l'évaluation des impacts perd en précision. C'est compliqué de réunir dans un outil un fonctionnement simple, « communicant », et une évaluation très précise.</p> <p>Les options de sobriété possibles, relatives par exemple au taux d'occupation, à l'occupation des surfaces, au partage d'espaces ou d'équipements ne sont pas couvertes directement, aucune des actions pré-paramétrées dans le modèle ne se rapportant à ces leviers (l'utilisateur peut néanmoins les dimensionner manuellement et les intégrer dans les scénarios via le recours aux actions non définies de réduction de consommation d'énergie par vecteur et par secteur). L'outil permet toutefois de s'en approcher dans le paramétrage manuel, en modifiant par exemple les nouveaux besoins de logements ou de surfaces tertiaires construites. L'approche de modélisation permet toutefois en théorie d'intégrer des actions, du moins leur impact, en reliant par exemple une action à un ratio de surface de tertiaire par activité reflétant un effort de mutualisation.</p>
Besoins identifiés	Données
Méthode	—
<h3>Positionnement dans la cartographie</h3>	
	<p><i>Outils et modèles</i></p> <p>L'outil <i>Prosper Actions</i> propose une simulation dynamique exploratoire de l'évolution de la consommation d'énergie d'un parc de bâtiments, au périmètre d'un territoire intercommunal ou plus large, partout en France métropolitaine. Il repose sur une reconstitution explicite, bottom-up de la consommation d'énergie par usage des bâtiments résidentiels et tertiaires, construite à partir de la simulation statique fournie par <i>Ernerter</i> et agrégée en moyenne communale. La projection procède par l'application d'actions prédefinies par rapport à un scénario « tendanciel » représentatif des mesures existantes.</p>
	<p><i>Champs et paramètres</i></p> <p>Cet outil se concentre naturellement sur la dimension bâtiments, dont il décrit les unités sous forme de surfaces répondant à différentes catégories selon leurs caractéristiques physiques et d'occupation. Il traite également la dimension des équipements, avec plus ou moins de détail explicite sur le nombre, le type et la performance selon qu'il s'agit de chauffage, d'eau chaude sanitaire ou d'équipements diffus, et du résidentiel ou du tertiaire. Il remonte ainsi, au niveau des ressources, les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre qui leur sont associées. Il ne développe en revanche de description explicite ni dans la dimension population ni dans la dimension économie, même si la première entre pleinement dans la modélisation via des indicateurs sur le nombre de ménages ou d'actifs par branche tertiaire.</p>



Chaînages et bouclages

L'outil **Prosper Actions** est conçu pour s'articuler avec **Enerter**, afin d'enchaîner, au même périmètre, une simulation statique fournissant le diagnostic, ou l'état des lieux, et une projection dynamique permettant de se comparer à un état final attendu, exprimé sous forme d'objectifs à atteindre.



Questions et enjeux

Par son approche de modélisation, cet outil semble notamment ouvert à différents enjeux prospectifs nouveaux, moyennant le cas échéant quelques renforcements. C'est notamment le cas dans le domaine de la **complétude technique**, s'agissant par exemple des usages des sols ou des besoins en infrastructures – une caractérisation vis-à-vis des réseaux étant déjà embarquée.

Par ailleurs, une des particularités de **Prosper Actions** est de permettre l'agrégation à différentes échelles emboîtées des trajectoires construites, de l'échelle de base, communale, à l'application préférentielle, intercommunale, puis par regroupement de ces trajectoires jusqu'au niveau départemental voire régional. Cette approche peut répondre à des enjeux relatifs aux **dynamiques territoriales**, qu'il s'agisse non seulement de cette cohérence inter-échelles mais aussi d'enjeux de différenciation des évolutions.

A33. Outil Perspectives gaz (GRDF)

Outil		
Modèle / outil	Outil perspectives gaz	<i>Cet outil, développé pour la prospective des exercices Perspectives gaz, fournit une trajectoire de consommation d'énergie pour l'ensemble des usages pouvant être alimentés en gaz dans le résidentiel et le tertiaire.</i>
Porteur(s)	GRDF et GRTgaz	
Développeur(s)	GRDF	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Antoine MONNET Modélisation et prospective - GRDF Benoît CHANTREUIL Direction développement - GRDF Aurélie LE MAÎTRE Direction stratégie - GRTgaz	antoine.monnet@grdf.fr benoit.chaintreuil@grdf.fr aurelie.lemaître@grtgaz.com
Prise d'information	Entretien conduit le 12/04/2023. Compléments apportés par les auteurs le 06/11/2023. Fiche validée le 07/07/2024.	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	L'outil a été développé par GRDF dans le cadre de l'exercice commun de prévision et de prospective de GRDF, Terga et GRTgaz sur les <i>Perspectives gaz</i> (également mené en coordination avec les autres gestionnaires de réseau, Teréga et Gaz & Territoires).	
Type d'outil	C'est un modèle de simulation, avec une description bottom-up et physique des changements et de leurs impacts.	
Champ de modélisation	C'est un modèle bâtiment multi-énergies en volume de consommation annuelle, qui dit peu sur la consommation saisonnière et a fortiori journalière. Un outil complémentaire est dédié à l'analyse des pointes de consommations journalières, notamment électriques.	
Usage type / périodicité	Cet outil est destiné à l'élaboration des scénarios des exercices <i>Perspectives gaz</i> , renforcés périodiquement et actualisés annuellement.	
Architecture	L'outil agrège pour la partie bâtiment deux modèles distincts, sur le résidentiel et le tertiaire, et travaille à partir de paramètres annuels pour sortir une consommation d'énergie.	
Rythme d'actualisation	Le modèle a été développé par GRDF, d'abord sur la consommation de gaz puis il a été complété sur les autres énergies. Une prestation externe a permis ensuite d'en lisser la forme (langage informatique...).	
Périmètre technique	Bâtiments Usages Population	Voir modules spécifiques.
Périmètre géograph.	Échelle Territoire	Le modèle peut fonctionner à l'échelle nationale, avec des hypothèses homogènes, ou entrer dans un découpage à l'échelle régionale, sur le périmètre administratif actuel. La modélisation couvre la seule France continentale (zone du réseau de transport de gaz exploité par GRTgaz et des réseaux de distribution de gaz de GRDF, Teréga et de Gaz & Territoires), la Corse (réseaux GPL) et les territoires d'outre-mer ne disposant pas de réseaux de distribution de gaz naturel.
Périmètre temporel	Horizon Pas temporel	L'outil peut être par construction utilisé à différents horizons de temps ; il est utilisé jusqu'à 2050 dans le cadre du volet prospective des exercices <i>Perspectives gaz</i> . Le modèle est calibré au pas annuel.
Principes de calcul	La modélisation repose classiquement sur un équilibrage incrémental entre des modules sectoriels de consommation – dont les deux modules sur le résidentiel et le tertiaire –, permettant d'agrégier une demande globale adressée au réseau de gaz et un module sur l'offre.	
Entrées	L'outil a besoin de données d'entrées statistiques permettant de caler les niveaux de consommation et de production dans des termes descriptifs conformes à ses catégories, de projections sur quelques déterminants démographiques et économiques, et d'hypothèses sur les différents leviers d'évolution du système qu'il modélise.	
Sorties	Dans l'exercice <i>Perspectives gaz</i> , seuls les résultats sur la consommation de gaz sont fournis mais le modèle produit un calcul couvrant toutes les énergies mises en jeu dans son périmètre.	
Détail		
Module spécifique	Module résidentiel	
Périmètre technique	Bâtiments Usages Population	Ce module couvre le parc résidentiel, avec une description du parc distinguant maisons individuelles et logements collectifs, et tenant compte pour ces derniers d'un système de chauffage collectif ou individuel. Il traite l'ensemble des usages susceptibles d'être fournis par du gaz : chauffage, eau chaude sanitaire (ECS), et cuisson. L'outil couvre l'ensemble des besoins de la population, au sens où elle constitue les occupants des logements dont il modélise la consommation, mais ne la considère que sous ce prisme et comme un tout à l'échelle nationale.
Périmètre géograph.	Échelle Territoire	Voir modèle général.
Périmètre temporel	Horizon Pas temporel	Voir modèle général.
Principes de calcul	Le modèle travaille à partir d'un stock de bâtiments, qu'il fait évoluer et auquel il associe des consommations. Il réévalue le stock bâti avec un pas de temps dynamique pour faire évoluer les	

besoins de construction, de démolition et de rénovation. Il associe des surfaces moyennes à chaque type de logement, y compris pour calculer les surfaces liées à la construction de nouveaux logements. Il s'appuie sur une projection démographique, qui intègre des hypothèses sur l'évolution du nombre de personnes par ménage. La première est tirée des projections de l'INSEE, les secondes sont construites sur la base des données de l'INSEE et du CEREN. Le croisement de différentes bases permet d'affiner, par exemple en s'appuyant sur BatiEtudes pour la répartition par type de chauffage des nouveaux logements tirés de Sitadel.

Pour la rénovation, le modèle permet le choix entre deux modes de fonctionnement : il peut prendre en compte un nombre de changement de classe au sens du DPE, ou un nombre de gestes et un nombre d'opérations atteignant le niveau BBC. Les hypothèses étaient ainsi alignées sur la SNBC dans le dernier exercice *Perspectives gaz*.

Pour chaque type de bâtiment, le modèle prend en compte une énergie principale de chauffage et la possibilité d'une énergie d'appoint.

Les hypothèses permettent de décrire la répartition du parc d'équipements, en distinguant par exemple le chauffage électrique par convecteurs ou pompes à chaleur (PAC) électriques, le recours à une chaudière gaz ancienne ou récente, ou encore le recours à une PAC hybride voire une PAC gaz, avec un peu plus de détail dans la modélisation sur les systèmes de chauffage faisant appel au gaz que sur les autres. Il prend également en compte le raccordement à un réseau de chaleur.

Le modèle contient aussi un parc descriptif sur l'ECS et la cuisson.

Le modèle part de données CEREN, complétées par des données sur les flux d'installation d'équipements telles que Uniclima. Plus précisément, il se base sur les parts de marché, fournies notamment par les statistiques du CEREN, et s'appuie pour tracer des évolutions sur les préférences des ménages telles qu'elles ressortent d'enquêtes, pour faire des hypothèses sur le renouvellement des systèmes avec la même énergie ou le changement d'énergie. Il applique ensuite une deuxième itération sur la probabilité de choisir tel ou tel type d'équipement.

Cette évolution du stock repose donc sur de grosses matrices descriptives des changements.

Le modèle mobilise ensuite différentes hypothèses d'évolution du rendement des équipements. Cela peut être peu important, par exemple sur des chaudières déjà hautement performantes, mais peut avoir un grand impact s'agissant par exemple des PAC.

Par ailleurs, le modèle paramètre pour chaque type de logement un niveau de consommation en kWh/m².an, et tout passe par ce périmètre. Il peut être fixe ou permettre de faire des tests de sensibilité sur la température de consigne.

Entrées	Le modèle repose sur trois grandes entrées : <ul style="list-style-type: none"> - l'évolution démographique, - le parc bâti, avec les hypothèses relatives à son rythme de construction / démolition et de rénovation, - les matrices de changement. Il a également besoin d'hypothèses spécifiques sur l'évolution des besoins de chauffage.
Sorties	L'outil fournit une courbe de consommation annuelle de gaz (et d'autres énergies, sur les usages couverts) pour le secteur résidentiel, décomposée par segment du parc et par usage.

Détail

Module spécifique	Module tertiaire
Périmètre technique	Bâtiments Le modèle couvre l'ensemble du tertiaire, découpé en branches d'activité (bureaux, cafés et restaurants, commerces, enseignement et recherche, sports, transports...), qu'il peut décrire à l'échelle nationale ou à l'échelle des régions administratives.
Usages	Il englobe les mêmes usages que le modèle résidentiel, auxquels il ajoute la climatisation.
Population	Le périmètre général de modélisation des Perspectives gaz prend en compte l'ensemble de la population à l'échelle nationale, mais elle n'intervient dans le paramétrage de ce module que sous l'angle du nombre d'emplois occupés dans les différentes branches tertiaires.
Périmètre géograph.	Échelle Territoire <i>Voir modèle général.</i>
Périmètre temporel	Horizon Pas temporel <i>Voir modèle général.</i>

Principes de calcul	Le modèle repose sur une description des bâtiments tertiaires en millions de m ² de surface segmentée par branche d'activité. Des niveaux de performance et de consommation d'énergie sont rapportés à chaque segment. Les évolutions des niveaux d'activité du tertiaire sont différencierées selon les secteurs, sur la base de scénarios externes. Il applique ensuite la même logique que le modèle résidentiel, avec des hypothèses sur le rythme de construction et de démolition, sur le nombre de rénovations, et une matrice de changement. Les besoins de chauffage sont exprimés par m ² , et il n'y a pas de distinction entre des classes de type DPE. Les rénovations sont donc directement traduites en gains de besoin de chauffage par m ² .
---------------------	---

Entrées	Comme le module résidentiel, ce modèle repose sur trois grandes entrées : les hypothèses de dimensionnement de l'activité des différentes branches tertiaires, et le même type d'hypothèses sur le parc bâti et sur les matrices de changement que pour le résidentiel.
Sorties	L'outil fournit une courbe de consommation annuelle de gaz (et d'autres énergies, sur les usages couverts) pour le secteur tertiaire, décomposée par segment du parc et par usage.

Éléments de discussion

Points forts	De par son objectif, le modèle est intrinsèquement descriptif, techno-explicite et fortement paramétrable, ce qui se prête naturellement à différentes analyses de sensibilité, y compris sur des paramètres impactants tels que des hypothèses de recohabitation dans le résidentiel, ou d'évolution sectorielle plus différenciée dans le tertiaire.
Questionnements et développements	Le modèle n'est pas libre de tout. Il intègre de l'inertie, au sens notamment où la matrice de changement ne s'applique chaque année qu'à la partie du parc de systèmes et d'équipements qui arrive en « fin de vie ». L'objectif est de rester sur des choses suffisamment précises et现实的. Le modèle autorise toutefois une certaine liberté, permettant par exemple de simuler une forte pénétration des PAC hybrides, de forcer un rythme de sortie comme celui des chaudières fioul, ou au contraire

d'allonger la durée de vie d'équipements, par exemple en augmentant le taux de rénovation de chaudières existantes.

Le modèle n'intègre pas de description à l'échelle du stock de bâtiments du couplage entre rénovation et changement d'équipements, qui constituent deux entrées distinctes. Il ne permet donc pas de représenter une évolution synchrone ni même séquencée entre les deux.

Le lien entre l'évolution de la population et le flux de constructions et de démolition est paramétrable, ce qui permet indirectement de prendre en compte une hypothèse de sobriété sur les surfaces.

Différents sujets bien identifiés ne sont pas pris en compte par le modèle, faute de possibilité technique ou de développement. C'est le cas notamment pour des sujets aussi divers que l'évolution de la valeur immobilière, les besoins de réseau et d'infrastructures associés à l'évolution des bâtiments et de leur consommation. L'outil prend toutefois certains aspects en compte, comme le degré de proximité du réseau gaz au niveau régional.

Les briques résidentiel et tertiaire sont indépendantes: le modèle ne réalise donc pas de couplage entre les deux secteurs, et tout changement dans le résidentiel ayant des implications sur le tertiaire, ou l'inverse doit être répercuté «à la main» par les opérateurs du modèle. En l'état par exemple, l'impact du télétravail n'est pas simulé en termes d'évolution des consommations d'électricité spécifique.

Le modèle travaille à réseau gaz figé pour la partie demande. C'est dans la partie production que sont intégrés le développement du gaz vert et l'évolution du réseau, avec une vérification du bouclage en sortie.

Les études et zonages sont faits par ailleurs pour interroger et piloter l'évolution du réseau, mais pas dans ce modèle qui est agrégé au niveau régional ou national et travaille à réseau constant.

Concernant la rénovation, la question de la lutte contre la précarité est posée et l'équipe travaille spécifiquement dessus, mais ce n'est pas intégré dans le modèle, qui ne permet pas de distinguer entre une rénovation pour un ménage précaire ou non. Tout passe par l'effet d'un changement de classe DPE ou de gestes de rénovation, avec un effet sur le kWh/m².

Cet effet est intégré dans le modèle avec un paramètre de sensibilité qui peut représenter un effet rebond (supplément de confort) et/ou une qualité de rénovation moindre qu'attendue, sans possibilité de les distinguer.

Par ailleurs, contrairement à la matrice de changement des systèmes, le modèle ne fournit pas d'inertie intégrée sur le nombre de rénovations, c'est à l'opérateur qu'il revient de veiller à ce paramètre.

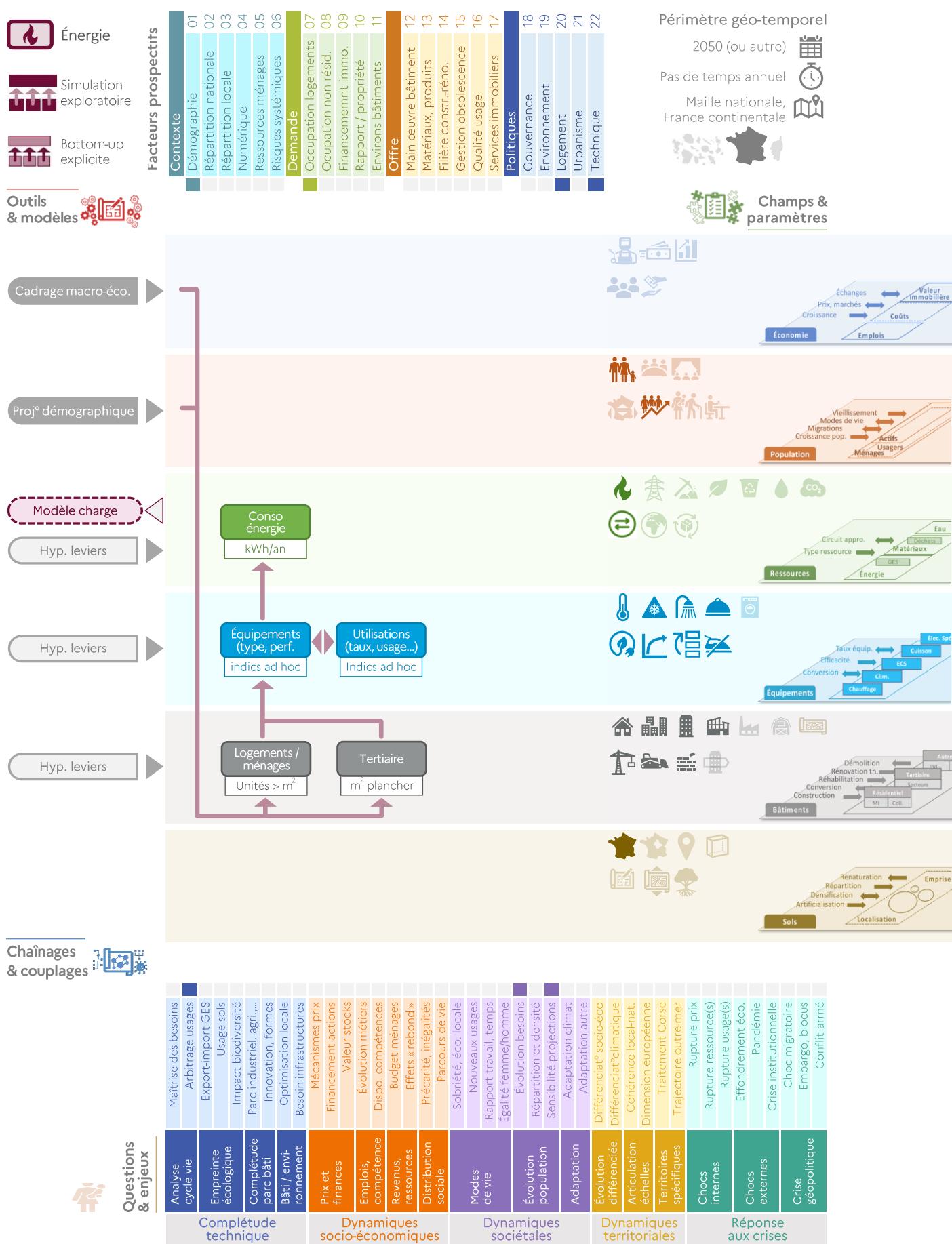
Pour usage interne, à côté de ce modèle, un modèle simplifié avec un asservissement permet de tester des variations. Un deuxième outil permet d'estimer les émissions de CO₂ du bâtiment.

Besoins identifiés	Données	Les sources de données ne sont pas toujours suffisamment complètes, diversifiées ou fiables.
	Méthode	—

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	Il s'agit d'un outil énergie de simulation exploratoire à visée prévisionnelle et prospective, fondé sur une description bottom-up et explicite. Il traite le résidentiel et le tertiaire et couvre tous les usages de l'énergie susceptibles d'être couverts par le gaz à l'échelle nationale, sur le périmètre de la France continentale, à un horizon 2050, au pas annuel.
	Champs et paramètres	Compte-tenu de ses objectifs et de son mode de construction bottom-up et techno-explicite, le modèle se concentre naturellement sur les trois dimensions physiques constitutives de la formation de la demande en énergie: celle du bâtiment , avec une description du stock de logements et du stock de surfaces tertiaires par les deux modèles correspondants, celle des équipements avec une description du stock sur un certain nombre de systèmes et des caractères liés aux performances et aux usages, et celle des ressources avec le calcul des consommations d'énergies, elles-mêmes rapprochées dans la modélisation globale des fournitures correspondantes. L'outil n'ouvre pratiquement aucune modélisation dans la dimension population , qu'il ne prend en compte que sous l'angle d'une projection démographique globale, à l'exception du paramètre lié au taux de cohabitation qu'il modélise, ni dans la dimension économie , qu'il ne touche qu'à travers l'évolution en nombre d'emplois du secteur tertiaire. Enfin, compte-tenu de son caractère national et de l'absence de description de la surface au sol des bâtiments, cet outil n'aborde pas la dimension sol .
	Chaînages et bouclages	Cet aspect n'a pas particulièrement été analysé. Dans la mesure où il est développé comme un outil autonome répondant à un besoin opérationnel déterminé, le modèle d'élaboration des trajectoires pour <i>Perspectives gaz</i> n'est pas relié par conception à d'autres outils. Il peut toutefois l'être avec des outils internes développés en complément par ses porteurs pour ses besoins spécifiques, comme le modèle de charge électrique permettant d'évaluer les impacts de la demande sur le besoin de production en pointe.
	Questions et enjeux	Sans doute en lien avec son objet relativement spécifique et non centré sur le bâtiment, cet outil présente peu de liens avec les questionnements nouveaux ou importants mis en évidence dans cette étude. Il s'inscrit néanmoins clairement, de par l'enjeu des transferts ou non d'usages sur son périmètre de modélisation, dans la problématique de l'arbitrage entre usages. Même s'il n'est pas conçu dans cette optique, il peut également, par son mode de construction des trajectoires, éclairer directement des questions telles que l'évolution des besoins ou la sensibilité des équilibres du système à des variations sur la projection démographique.

Outil perspectives gaz (GRDF)



A34. Omphale (INSEE)

Outil			
Modèle / outil	Omphale	Cet outil fournit des projections de référence pour l'évolution de la population française, pouvant servir de base à différentes modélisations.	
Porteur(s)	INSEE		
Développeur(s)	INSEE		
Interlocuteur(s) et ressources			
Contact(s)	<p>Delphine LEGLISE Cheffe du Pôle de service à l'action régionale - INSEE</p> <p>Julie GOUSSEN Cheffe d'investissement responsable des projections de ménages - INSEE</p>	<p>delphine.leglise@insee.fr</p> <p>julie.goussen@insee.fr</p>	
Prise d'information	Entretien conduit le 05/04/2023. Compléments apportés par les auteurs le 24/10/2023. Fiche validée le 13/10/2024.		
Ressources	https://www.insee.fr/fr/information/3683517 https://www.insee.fr/fr/information/6537099 https://www.insee.fr/fr/information/6537343 https://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/a-la-une/carte-a-la-une/demographie-france-2044		
Modèle général			
Finalité	<p>Le modèle Omphale permet de réaliser des projections de population sur des zonages infra nationaux composés d'ensemble de communes (adjacentes et si la population concernée est supérieure à 50 000 habitants), ainsi que des projections dérivées (ex : nombre d'élèves, personnes âgées dépendantes, ménages).</p> <p>Plusieurs scénarios sont proposés. Il ne s'agit pas de prévisions, mais des projections si les jeux d'hypothèses se réalisent. Ces jeux d'hypothèses ont été construits et validés avec des démographes pour englober la variabilité probable des variables.</p> <p>Le modèle est utilisé pour des publications et des données mises à disposition gratuitement. Il est également utilisé par les directions régionales pour répondre à des demandes d'acteurs publics et privés.</p> <p>Omphale peut être chainé avec OTELO (outil développé et maintenu par la DHUP) pour déterminer le besoin en logements sur un territoire à partir des projections de ménages.</p>		
Type d'outil	Outil de simulation démographique.		
Champ de modélisation	Le modèle porte spécifiquement sur la projection de l'évolution de la population, selon différentes combinaisons d'hypothèses démographiques.		
Usage type / périodicité	Cet outil est mis à la disposition d'utilisateurs souhaitant intégrer des projections démographiques dans leur propre modélisation, évaluation prévisionnelle ou prospective. Il est pour cela régulièrement actualisé.		
Architecture	<p>L'évolution de la population d'un territoire dans le temps résulte de l'interaction entre trois composantes démographiques: les naissances, les décès et les migrations (internes à la France et solde migratoire avec l'étranger).</p> <p>Le modèle propose une modélisation de ces composantes à partir de l'observation récente des comportements démographiques.</p> <p>Le code source ainsi qu'une documentation du modèle sont mis à disposition en ligne.</p>		
Rythme d'actualisation	Le modèle actuel est Omphale 2022. Il succède aux modèles Omphale 2010 et Omphale 2017.		
Périmètre technique	<p>Bâtiments</p> <p>Usages</p> <p>Population</p>	<p>Cet outil n'intègre pas de description au niveau des bâtiments.</p> <p>Il ne porte pas non plus sur les usages.</p> <p>Le modèle porte spécifiquement sur la population, qui est segmentée par sexe et par tranche d'âge, sur la zone d'étude, et regroupée par ménages.</p>	
Périmètre géograph.			
Périmètre temporel	<p>Échelle</p> <p>Territoire</p>	<p>Le modèle tient compte des caractéristiques de la population à la maille communale pour réaliser des projections de population sur tout zonage à façon composée d'ensemble de communes.</p> <p>Il couvre la France entière, outre-mer compris.</p>	
	<p>Horizon</p> <p>Pas temporel</p>	<p>Le modèle permet une projection à 2070 pour la population. Il porte toutefois plutôt sur l'horizon 2050 concernant la description de la population sous forme de ménages.</p> <p>Les projections sont construites au pas annuel</p>	
Principes de calcul			
	<p>La philosophie du modèle est de ne prendre en compte que des phénomènes démographiques observables à ce jour. Les tendances démographiques sont alors prolongées, sur la base des tendances observées, comme l'évolution de la fécondité, ou l'héliotropisme vers le Sud de la France.</p> <p>Des jeux d'hypothèses hautes ou basses sont déterminées autour d'un scénario central.</p> <p>La 1^{ère} utilisation de l'outil est de projeter ce qui va se passer si les tendances actuelles se prolongent. Par soucis d'homogénéité, les jeux d'hypothèse et la méthodologie sont établis au niveau national et sont utilisables au niveau régional.</p> <p>Il est également possible de réaliser des hypothèses à façon pour prendre en compte des spécificités locales (par exemple, l'implantation d'une grande industrie créant de nombreux emplois).</p>		
Entrées	<p>Le modèle est exclusivement basé sur les données du recensement de la population, seul jeu de données à la maille des communes et homogène au niveau méthodologique.</p> <p>Le modèle Omphale prend sur cette base en compte les onze hypothèses suivantes: (1) population centrale, haute ou basse; (2) fécondité haute ou basse; (3) espérance de vie haute ou basse; (4) migrations hautes ou basses; (5) population jeune (fécondité haute, migration haute et espérance de vie basse), et enfin (6) population âgée (fécondité basse, migration basse et espérance de vie haute).</p>		

<p>Les flux migratoires avec l'étranger sont traités au niveau national. Les jeux d'hypothèses sont caractérisés par une grande dispersion, autour de la valeur moyenne de +70 000 la fourchette va de 20 à 120 000 personnes par an. Pour passer de la population au nombre de ménages, l'outil s'appuie sur les hypothèses d'évolutions des comportements de cohabitation du SDES. Comme pour les hypothèses démographiques, seules les tendances observables à ce jour sont prises en compte.</p>	
Sorties	À partir de ces hypothèses, en les croisant, le modèle fournit des projections de population par sexe et par tranche d'âge, et par territoire (à l'échelle de plus de 50 000 habitants). Grâce à la segmentation sur laquelle il repose, le modèle fournit également des projections dérivées, portant notamment sur les ménages (leur nombre, leur taille moyenne, leur répartition) mais aussi par exemple sur le nombre d'élèves, de personnes âgées dépendantes, etc.
Éléments de discussion	
Points forts	Omphale est « le » modèle de référence des projections démographiques territoriales. Il dispose d'une grande finesse dans la granulométrie (tranches d'âge et territorialisation).
Questionnements et développements	Les DOM sont également documentés, à noter cependant une certaine fragilité des données sur Mayotte, liée à un mode de recensement différent du reste de la France (tous les 5 ans et non enquête annuelle). En utilisation classique, le modèle ne prend en compte que les tendances observables à ce jour. Des tendances nouvelles démographiques (eg. impact du réchauffement climatique sur l'attractivité du Sud de la France ou sur la mortalité des personnes âgées, ou encore des nouvelles pratiques de cohabitation etc.) ne sont pas prises en compte, mais des jeux d'hypothèses peuvent être fournis pour simuler d'autres tendances.
Besoins identifiés	Données Il n'y a pas de sujet, dans la mesure où l'outil est basé sur le recensement qui est la meilleure base de données disponible. Le modèle est plutôt fournisseur de données pour d'autres travaux. C'est d'ailleurs l'objectif de l'INSEE que les projections qu'elle produit soient utilisées.
Méthode	—
Positionnement dans la cartographie	
	Outils et modèles Omphale est un outil de projection par simulation descriptive de l'évolution de la population, construit sur la base des statistiques démographiques nationales et fondé sur une segmentation fine de la population, y compris du point de vue territorial.
	Champs et paramètres Le modèle ne traite pas par construction que de la dimension population, qu'il traite à la fois comme un ensemble d'individus et de regroupement par ménages. Par ailleurs, sans développer explicitement la dimension des sols, dans la mesure où il ne représente pas les bâtiments qu'occupe la population ni donc leur implantation, le modèle prend en compte, via les migrations et la segmentation par unités de population, la dimension territoriale.
	Chaînages et bouclages L'outil Omphale propose des trajectoires démographiques à l'échelle de la population française, qui correspondent aux besoins en données d'entrée de nombreux exercices. Un chaînage est notamment opéré, dans le champ des modèles portés par des acteurs institutionnels, avec le modèle de simulation des besoins de logement OTELO, afin de projeter les besoins à l'échelle des territoires. Sans que les chaînages soient organisés du point de vue de l'interfaçage, les projections fournies par Omphale servent de façon repérée de données d'entrée pour de nombreux modèles considérés dans l'étude.
	Questions et enjeux Le caractère unidimensionnel de cet outil, puisqu'il ne travaille que sur la dimension population, et son champ relativement normatif de projection de fourchettes possibles d'évolution de la population selon des combinaisons d'hypothèses hautes ou basses limitent son potentiel vis-à-vis des questionnements prospectifs identifiés. Il semble toutefois pertinent d'envisager une utilisation plus prospective pour explorer, dans le champ sociétal, un spectre plus large d'évolution de la population. Cet outil fournit également une piste privilégiée pour construire, à l'appui de préoccupations au croisement de l'impact des changements d'environnement et de la question territoriale de différenciation des trajectoires, des projections relatives à l'impact possible du changement climatique sur la répartition de la population sur le territoire national.

A35. ECLORE (Institut négaWatt)

Outil		
Modèle / outil	ECLORE	<i>Cet outil propose une caractérisation des besoins en emplois et compétences associés à la mise en œuvre de stratégies ambitieuses de rénovation énergétique du parc résidentiel et tertiaire, à différentes échelles territoriales.</i>
Porteur(s)	Institut négaWatt	
Développeur(s)	Institut négaWatt, avec KAPT	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Vincent LEGRAND Gérant de l'Institut négaWatt	v.legrand@institut-negawatt.com
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 10/09/2024. Revue et complétée par les porteurs du projet ECLORE le 18/10/2024 Fiche validée le 17/10/2024.	
Ressources	https://www.institut-negawatt.com/59-eclore-outil-de-planification-des-emplois-et-competences-du-batiment/	
Modèle général		
Finalité	ECLORE (Emplois et Compétences LOcales de la Renovation performante) est un outil numérique de planification territoriale des besoins en emplois et compétences pour gérer la montée en puissance de la rénovation performante en France.	
Type d'outil	Il s'agit d'un outil de simulation normative et explicite de trajectoires de rénovation thermique du parc de bâtiments et d'emplois correspondants, intégrant dans son application une part d'optimisation dans le lissage des besoins (en lien avec un objectif moyen de performance prédéterminé).	
Champ de modélisation	Le modèle porte spécifiquement sur les actions de rénovation appliquées au parc résidentiel et tertiaire et sur les emplois mobilisés pour effectuer les gestes correspondants, et atteindre pour chaque territoire (EPCI) le niveau moyen du BBC-Rénovation, conformément aux objectifs du Code de l'énergie.	
Usage type / périodicité	L'intention portée par ECLORE est de fournir, à différentes échelles territoriales (du niveau intercommunal jusqu'au niveau national), un outil pour quantifier et qualifier les besoins en emplois, formations et compétences de la rénovation performante sur chaque territoire, en lien avec le cadre législatif et réglementaire des objectifs et moyens fixés, en regard des dynamiques observées.	
Architecture	Le modèle repose sur des matrices descriptives du parc bâti, distinguant résidentiel et tertiaire et intégrant différentes caractéristiques informant leur besoin de rénovation thermique, pour atteindre la performance à terme (2050) Un module de calcul permet alors de produire des scénarios de rénovation de l'ensemble de ce parc, à l'horizon 2050, décrit sous forme de gestes coordonnés de rénovation, et calculé en tenant compte d'un objectif à atteindre et d'une fonction de lissage des volumes sur l'ensemble de la période. Via un tableau de conversion des gestes de rénovation en emplois correspondants dans les différentes missions (de la conception à l'exécution puis au contrôle) et dans les différents corps de métiers, le module de calcul produit une trajectoire d'emplois bruts associés à chaque scénario de rénovation. Cette trajectoire peut alors être comparée à des matrices descriptives des entreprises, des emplois et des formations se rapportant au bâtiment, afin d'identifier le différentiel entre les besoins et l'existant, au fil des années.	
Rythme d'actualisation	L'outil ECLORE s'inscrit dans le cadre du programme CEE Facilaréno2, ce qui en fait un outil libre. Il a fait l'objet à partir de mi-2022 d'un développement porté par l'Institut négaWatt, et soutenu pour le développement informatique par l'entreprise KAPT, afin de parvenir à une première version opérationnelle. Celle-ci a pu s'appuyer sur des collaborations stratégiques avec France Stratégie, avec la Direction régionale de l'économie, de l'emploi, du travail et des solidarités (DREETS) de la région Auvergne-Rhône-Alpes et avec l'ADEME, et sur des travaux exploratoires avec neuf territoires partenaires. Son déploiement opérationnel s'accompagnera probablement d'évolutions, dont il est trop tôt pour préciser le rythme et les modalités d'actualisation.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le périmètre couvert est l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires, tous types confondus.
	Usages	La modélisation proposée par cet outil se concentre spécifiquement, en lien avec les usages thermiques, sur les actions de rénovation énergétique du bâtiment.
	Population	Le modèle ne s'intéresse pas à la population des occupants ou usagers des bâtiments, mais se concentre sur la population des actifs concernés ou potentiellement concernés par la mise en œuvre de ces actions de rénovation.
Périmètre géograph.	Échelle	L'outil s'applique à différents périmètres géographiques, avec une déclinaison opérationnelle possible à quatre échelles: le périmètre national, les régions, les départements et les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI).
	Territoire	Le modèle s'applique à ces différentes échelles sur le territoire de la France métropolitaine.
Périmètre temporel	Horizon	ECLORE est en l'état calibré pour informer les besoins liés à l'atteinte d'un objectif fixé à 2050.
	Pas temporel	L'outil fonctionne, pour la description des trajectoires et des besoins en emplois et compétences, sur un calcul au pas annuel.
Principes de calcul	L'outil, dans son principe, repose sur une approche en quatre phases: <ul style="list-style-type: none">• un état des lieux du parc de bâtiments (résidentiels et tertiaires) sur le territoire, couvrant les différentes caractéristiques utiles pour la suite,• la construction d'un scénario prospectif de rénovation des bâtiments à l'horizon 2050, aligné sur l'objectif d'atteindre un niveau BBC en moyenne nationale fixé par le Code de l'énergie,• le calcul du nombre d'emplois bruts nécessaire à la rénovation du parc bâti au fil du temps, conformément à ce scénario,• une comparaison entre ce nombre d'emplois bruts et les ressources disponibles sur le territoire, permettant d'identifier les besoins en termes d'emplois nets et de formation. Pour la première étape, les données visent à caractériser l'ensemble du parc du point de vue de la nature et du volume des besoins en rénovation qu'il génère pour atteindre l'objectif fixé, afin de traduire quantitativement et qualitativement ces besoins en emplois.	

Pour le parc résidentiel, l'unité d'entrée est le logement. Il s'agit notamment de caractériser la typologie des logements, de l'année de construction des bâtiments, de leur niveau de performance énergétique, approché par le diagnostic de performance énergétique(DPE), de l'énergie de chauffage, mais également d'éléments tels que la typologie de toiture, la situation en zone classée, etc.

Pour le parc tertiaire, l'unité d'entrée est la surface utilisée. Il s'agit, dans le même esprit, de caractériser les usages, l'année de construction des bâtiments, les surfaces mobilisées, et différentes informations intéressantes les conditions de mise en œuvre de leur rénovation.

Le modèle calcule ensuite une trajectoire de rénovation visant l'atteinte de l'objectif à 2050, exprimée en nombre de rénovations performantes par an. Il intègre pour cela une typologie de rénovation, depuis les gestes d'opportunités à la rénovation globale (rénovation performante en une étape, suivant la définition du Code de la construction) en passant par des packs de travaux, et s'appuie sur une description des gestes de travaux. L'outil calcule par défaut un scénario correspondant à l'objectif d'atteinte d'une moyenne nationale BBC conformément au Code de l'énergie. Il intègre une logique d'optimisation, visant à assurer la plus grande stabilité possible du nombre annuel de rénovations sur la période couverte. L'outil permet également de calculer un scénario dit «tendanciel», consistant à figer le nombre de rénovations annuel au niveau constaté initialement. Il permet enfin de calculer des scénarios personnalisés, en fonction d'un paramétrage par l'utilisateur sur l'objectif à atteindre en moyenne en 2050 ou sur le rythme annuel de rénovations.

Il en déduit alors un nombre d'emplois (en emplois équivalent temps plein, ou ETP) nécessaires chaque année, qu'il décline par fonction (conception, coordination, exécution, etc.), par famille de métiers (intervention sur le toit et l'ossature, sur les fluides, sur les sols, etc.) et par corps d'État (façadiers, électriciens, etc.).

Enfin, pour traduire ce besoin en termes de création d'emplois et de formation, il croise cette trajectoire d'emplois annuels avec l'état des lieux des emplois et compétences vu au prisme des entreprises concernées. Il intègre pour cela une répartition des entreprises, avec une répartition par domaine, par taille, par année de création, etc., une description des emplois et de l'activité avec une répartition des actifs par statut, corps d'État, âge, etc. Enfin, il prend également en compte une caractérisation des formations, avec les établissements, les qualifications proposées, le nombre de personnes concernées, en distinguant formation initiale et continue.

Entrées	<p>Les données d'entrée du modèle portent essentiellement sur la caractérisation du parc bâti d'une part, et de l'état des lieux de l'activité et des formations se rapportant au bâtiment d'autre part. Elles permettent ainsi de caractériser :</p> <ul style="list-style-type: none">• le parc de bâtiments résidentiels, avec des données sur sa structure, sur le type de logements, la période de construction, la classe énergétique et l'énergie de chauffage;• le parc de bâtiments tertiaires, avec des données sur les usages et surfaces, la période de construction et la classe énergétique;• les entreprises du bâtiment, avec les établissements par activité, leur taille, et les créations et défaillances d'entreprises;• les emplois du bâtiment, avec le statut des employés, les salariés par activité, leur pyramide des âges, les demandeurs d'emplois et les projets de recrutement;• la formation initiale, avec les sessions et établissements et le nombre d'élèves concernés (par voie scolaire ou en apprentissage);• la formation continue, avec les sessions et organismes de formation, et les stagiaires par statut.
Sorties	<p>Sur cette base, le modèle calcule des jeux de scénarios : un scénario de rénovation du parc résidentiel, un scénario de rénovation du parc tertiaire, et un scénario en emplois combinant les besoins issus de ces deux trajectoires.</p> <p>Il propose par défaut un calcul de scénarios répondant à l'objectif normatif correspondant à l'atteinte du niveau BBC en moyenne à l'échelle nationale, qu'il compare à un scénario tendanciel fixant le niveau de rénovations au niveau actuel. Il permet également à l'utilisateur de paramétriser des scénarios personnalisés.</p> <p>Les résultats sont fournis en termes de rénovations affichables par typologie de parc, de rénovation, par période constructive ou par classe énergétique, puis de nombre d'emplois mobilisés affichables par type de parc et par métier.</p> <p>Enfin, ECLORE fournit par comparaison avec le tendanciel des résultats sur les besoins en ETP supplémentaires à différentes échéances, par type de parc, par fonction (conception, exécution, accompagnement, contrôle...) et par métiers.</p>

Éléments de discussion

Points forts	<p>Le modèle ECLORE se concentre sur l'enjeu de l'adéquation des besoins en emplois et compétences avec les besoins en rénovation énergétique du parc résidentiel et tertiaire en regard des objectifs de la transition énergétique. Il est conçu pour traiter cet enjeu, avec une déclinaison de plus en plus précise et opérationnelle, de l'échelle nationale à l'application à l'échelle intercommunale.</p> <p>L'outil est conçu pour répondre à ces différentes échelles aux besoins de différents utilisateurs et prescripteurs, depuis une approche d'accompagnement et de sensibilisation aux enjeux d'emplois et compétences pour la rénovation auprès de donneurs d'ordre, à l'établissement d'états des lieux partagés sur les priorités et la feuille de route en matière de rénovation, le mapping des compétences, la cartographie des formations, jusqu'à l'élaboration de stratégies. Il permet en particulier d'éclairer les enjeux de transition professionnelle pour le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP), et les enjeux de développement de formations.</p> <p>ECLORE apporte un regard très complémentaire aux pratiques de Gestion prévisionnelle des emplois et des compétences (GPEC), basées sur les tensions ressenties les années passées, pour proposer une Gestion prospective des emplois et des compétences intégrant et anticipant la nécessaire montée en puissance de la rénovation performante sur chaque territoire.</p>
Questionnements et développements	<p>Si l'enjeu d'une adaptation des emplois et compétences aux besoins de rénovation performante est central, la question des emplois et compétences du secteur du BTP doit nécessairement être posée en lien avec son activité dans le neuf. Aussi, l'équipe d'ECLORE travaille à l'intégration du bâtiment neuf dans l'outil, ce qui constitue une étape importante d'une vision complète des besoins en emplois et compétences dans le secteur du bâtiment.</p> <p>L'outil prend tout son intérêt s'il sert de support à des échanges entre les acteurs des emplois et des compétences : acteurs de chaque territoire, et acteurs des différents niveaux territoriaux (directions formation des Régions, Ministère du Travail, DREETS, OPCO...). L'outil devra être intégré dans des</p>

démarches de médiation pour porter tous ses fruits; des échanges sont en cours avec l'ADEME, dans la continuité du projet BUS2, pour s'inspirer des travaux du Support au dialogue prospectif développés avec Alliance Ville Emplois sur des territoires d'expérimentation.

Besoins identifiés	Données	—
	Méthode	—

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	ECLORE est un modèle de simulation normative et explicite de trajectoires de rénovation thermique du parc de bâtiments et d'emplois correspondants, intégrant dans son application une part d'optimisation dans le lissage des besoins, qu'il calcule au pas annuel à l'horizon 2050. Il peut s'appliquer avec une granulométrie adaptée à des calculs depuis l'échelle nationale de la France métropolitaine jusqu'à celle de l'intercommunalité.
	Champs et paramètres	Cet outil travaille essentiellement, si ce n'est uniquement, sur les deux dimensions qu'il vise spécifiquement à relier: celle des bâtiments, qu'il décrit sous forme d'unités de logements pour le résidentiel et de surfaces pour le tertiaire, et des gestes de rénovation qui s'appliquent à eux, et celle de l'économie, avec l'ensemble des emplois associés, qu'il décrit en termes de nombre de postes dans les entreprises et de personnes suivant des formations.
	Chaînages et bouclages	La conception d' ECLORE a jusqu'ici porté sur l'élaboration d'un modèle auto-portant, suffisamment explicite et désaggrégié pour fonctionner de manière autonome. Sa structure bottom-up et son caractère ouvert se prêtent toutefois assez bien à des interfaçages potentiels, tant du point de vue de son articulation avec d'autres modes de simulation de trajectoires sur le bâtiment qu'en termes d'utilisation directe de ses résultats dans d'autres exercices.
	Questions et enjeux	Ce nouvel outil vise clairement à explorer l'un des sujets identifiés comme questions et enjeux dans le champ des dynamiques socio-économiques , relatif à celle des emplois et des compétences. Il l'aborde à la fois sous l'angle de l'évolution des métiers, et des transitions professionnelles, et sous celui de la disponibilité des compétences nécessaires à la transformation du parc. Au-delà de cette question, sa construction permet d'envisager, par sa capacité d'application à différentes échelles, des liens avec l'enjeu sociétal d'une évolution de la répartition de la population, et du point de vue territorial avec les questions de cohérence entre les différentes mailles de territoire.

A36. Planiss'Immo (Institut négaWatt)

Outil		
Modèle / outil	Planiss'Immo 2050	Cet outil développe une simulation de trajectoires énergie et gaz à effet de serre de parc bâti, destinée à accompagner des gestionnaires de parc dans l'élaboration de leur stratégie.
Porteur(s)	Institut négaWatt	
Développeur(s)	Institut négaWatt & Enertech	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Rémi BONVALET Responsable du pôle Transition énergétique du bâti - Institut négaWatt Noé DELARGUILLIÈRE ingénieur d'études & Chef de projets Transition énergétique du bâti- Institut négaWatt Samuel MARTIN Co-responsable du pôle Mesure, coordinateur AMO Collectivités - Enertech Christophe PLANTIER Co-responsable du pôle MOE-AMO - Enertech	r.bonvalet@institut-negawatt.com n.delargilliere@institut-negawatt.com martin@enertech.fr plantier@enertech.fr
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 28/03/2023 – relue le 12/04/2023. Revue et complétée par les auteurs le 13/10/2023. Fiche validée le 17/10/2024.	
Ressources	https://www.planissimmo2050.fr/	
Modèle général		
Finalité	Plus qu'un outil, Planiss'Immo désigne une démarche d'accompagnement de gestionnaires dans la trajectoire de transition énergétique et bas carbone de leur parc bâti à l'horizon 2050. Cette démarche s'appuie sur un outil de modélisation du parc et de son évolution.	
Type d'outil	L'outil de modélisation proposé dans le cadre de cette démarche est un outil classique de simulation ouverte, techno-explicite, de la consommation d'énergie du parc bâti.	
Champ de modélisation	Le champ d'application est celui des parcs bâties tertiaires, à l'échelle de leur gestionnaire, et de leur consommation d'énergie.	
Usage type / périodicité	<p>La démarche s'adresse principalement au parc tertiaire des collectivités territoriales, mais l'utilisation de l'outil peut en principe s'étendre à d'autres situations. Elle s'inscrit, pour chaque partenaire pour lequel elle est déployée, dans un accompagnement où l'outil peut être adapté à ses besoins. Ces adaptations, ainsi que la volonté de faire évoluer plus largement l'outil, nourrissent un processus d'amélioration plus ou moins continue, qui ne fait pas l'objet d'une périodicité particulière.</p> <p>L'utilisation de l'outil Planiss'Immo s'inscrit systématiquement dans une démarche plus globale d'accompagnement du gestionnaire de parc concerné, qui est accompagné dans cette utilisation. Ainsi, la mise en place de la démarche commence par un état des lieux des données et documents disponibles, avant trois phases :</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) une vision des enjeux, qui se concentre sur la collecte des données de caractérisation du parc, leur intégration dans l'outil et leur analyse, pour construire un diagnostic partagé, multicritères, des besoins d'action ; (2) une vision des possibles, qui intègre une formation à la scénarisation dans l'outil, permettant de définir des actes stratégiques, de prioriser les leviers d'action, et de chiffrer les volumes correspondant, jusqu'à parvenir à des plans d'action mis en récit ; (3) une vision du chemin, qui repose sur une analyse en coût global et en volume des trajectoires, mises en miroir des sources possibles de financement comme des capacités opérationnelles. <p>Des besoins de renforcement peuvent être traités, via l'outil ou en s'appuyant sur lui, sur des sujets d'intérêt tels que les métiers et compétences, la mise en œuvre de rénovations complètes et performantes, l'approfondissement de la maîtrise de la demande, les usages électriques spécifiques, ou encore l'organisation des services et des réseaux.</p>	
Architecture	L'outil repose sur une approche de modélisation classique, qui s'appuie sur une description du parc considéré, en termes de surfaces, de consommations actuelles, d'usages etc. pour calculer son évolution, en combinant des hypothèses relatives à la construction de bâtiments, aux actions de rénovation, à des sobriétés d'usage, ou encore de déploiement d'énergies renouvelables.	
Rythme d'actualisation	L'outil, utilisé de façon indépendante et singulière dans différents contextes, ne fait pas l'objet d'une démarche organisée d'actualisation, même s'il évolue et s'ajuste au gré des utilisations.	
Périmètre technique	Bâtiments	L'outil s'applique en principe à l'ensemble du parc bâti que l'on souhaite considérer, indifféremment de la typologie des bâtiments, de leur usage ou de leur localisation dès lors que les données de caractérisation nécessaires peuvent être réunies. Il est toutefois développé principalement dans le but de modéliser les stratégies d'amélioration de la performance de parcs tertiaires, et appliqué pour l'essentiel au patrimoine de gestionnaires publics.
	Usages	La modélisation couvre l'ensemble des usages énergétiques associés à l'occupation des bâtiments, avec une attention particulière pour les usages liés au chauffage.
	Population	La population n'est pas décrite dans le modèle, même si elle intervient implicitement dans la caractérisation des usages des bâtiments, ou dans la formation d'hypothèses sur le besoin de construction neuve.
Périmètre géograph.	Échelle	La démarche, et donc l'outil, ne sont pas conditionnés à l'application à une certaine échelle, mais sont plutôt conçus pour être déployés à l'échelle d'un parc géré par un acteur public sur un territoire pouvant aller de l'échelle intercommunale à l'échelle régionale.
	Territoire	L'outil peut s'appliquer partout sur le territoire en France métropolitaine.
Périmètre temporel	Horizon	La modélisation proposée dans le cadre de Planiss'Immo peut se déployer à différents horizons de temps, mais elle est plus particulièrement calibrée pour fournir une aide à la décision sur les stratégies de décarbonation à l'horizon 2050.

	Pas temporel	Le pas de temps du modèle est l'année.
Principes de calcul		<p>Le calcul s'appuie sur une caractérisation du parc, qui inclut différents éléments descriptifs pour les faire évoluer : les surfaces, les niveaux de consommation d'énergie, les usages des locaux.</p> <p>Il projette ensuite l'évolution des consommations, et des émissions de gaz à effet de serre associées, en appliquant à ces caractéristiques initiales différentes hypothèses, paramétrables en fonction des stratégies envisagées par l'utilisateur. Ces hypothèses peuvent porter sur l'évolution des surfaces, avec un volume de constructions neuves, sur la performance thermique des bâtiments avec des actions de rénovation, sur des évolutions des consommations liées à l'application d'une sobriété d'usage, et sur le mix énergétique consommé grâce à des hypothèses de substitution.</p> <p>Ces hypothèses, en particulier celles qui portent sur des actions de construction, de rénovation ou de changement des systèmes de chauffage, sont rapportées dans le modèle à des coûts d'investissement, qui peuvent être rapprochés des capacités financières.</p> <p>Chaque trajectoire retenue est documentée par des indicateurs globaux portant sur les consommations d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre, les volumes d'investissements, etc.</p>
Entrées		L'outil s'appuie, de façon classique, sur des données d'entrée de deux sortes. La première concerne la caractérisation du parc auquel la modélisation s'applique, avec des données relatives aux surfaces en jeu, à leur usage, ainsi qu'aux consommations d'énergie, en lien avec leur performance énergétique. Cette partie descriptive inclut également des données sur les coûts unitaires des opérations comptabilisées en investissement. La seconde porte sur le développement des trajectoires envisagées, à partir des paramètres choisis par l'utilisateur pour désigner le niveau d'action sur les différents leviers que lui propose le modèle.
Sorties		Les résultats en sortie portent sur les trajectoires de consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre associées du parc bâti considéré, en permettant sur la base d'indicateurs agrégés une comparaison entre elles. Les trajectoires d'investissement dans la gestion du parc en lien avec l'évolution de sa performance énergétique et climatique sont également fournies.
Éléments de discussion		
Points forts		L'outil Planiss'Immo est conçu comme un élément d'une démarche plus globale d'accompagnement, qui repose notamment sur sa bonne appropriation par les utilisateurs. Il est à ce titre simple d'emploi et modulable, donc flexible dans ses usages.
Questionnements et développements		Comme tous les outils de simulation appliqués aux consommations d'énergie du bâtiment, le bon fonctionnement du modèle repose sur la qualité des données d'entrée qui lui permettent de s'appliquer à chaque cas d'étude. Un effort constant vise donc à rapprocher le modèle des données concrètement disponibles chez les gestionnaires de parc, et à fiabiliser celles-ci.
Besoins identifiés	Données	—
	Méthode	—
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	L'outil Planiss'Immo propose une simulation ouverte, techno-explicite, de la consommation d'énergie applicable à un parc bâti, utilisée dans le cadre d'un accompagnement de gestionnaires de parc sur leur stratégie de planification de l'amélioration des performances énergétiques. Il s'applique aux parcs tertiaires et permet de calculer des trajectoires de consommation d'énergie et des besoins en investissements correspondants.
	Champs et paramètres	Le modèle travaille principalement dans trois dimensions. Il porte avant tout sur la dimension bâtiments , approchée par des unités de surface d'activité tertiaire et par des leviers de construction et de rénovation, et dans la dimension ressources , où il se concentre sur la consommation d'énergie mais considère aussi, en lien avec des hypothèses touchant aux équipements et aux substitutions d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre associées. Il fait également un lien avec la dimension de l' économie , en rapprochant les actions relatives aux bâtiments de coûts d'investissement et de capacités financières.
	Chaînages et bouclages	Bien que son approche de simulation ouverte et son caractère explicite et désagrégé se prêtent assez bien à être interfacé en entrée ou en sortie avec d'autres outils, l'outil Planiss'Immo est conçu pour fonctionner de manière autonome, dans le cadre d'une utilisation directe par les acteurs auprès desquels cette démarche d'accompagnement est déployée.
	Questions et enjeux	Cet outil, conçu pour être le support d'une démarche d'évaluation et de planification à l'échelle du gestionnaire d'un parc bâti, se prête peu à l'exploration des questions et enjeux identifiés à l'échelle de la prospective nationale. Il peut toutefois, en imaginant que sa souplesse d'utilisation offre la possibilité d'introduire au cas par cas de nouvelles dimensions, être relié à des enjeux d'application ponctuelle comme l'optimisation locale ou l'articulation entre le local et les échelles plus grandes.

A37. BuildingModel (Mines Paris)

Outil		
Modèle / outil	BuildingModel	<i>Modèle de simulation des consommations d'énergie des bâtiments résidentiels et tertiaires à une échelle infranationale, basé sur une modélisation à l'échelle des bâtiments.</i>
Porteur(s)	MINES Paris PSL - PERSEE center	
Développeur(s)	Yassine Abdelouadoud, Martin Rit, Robin Girard	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Robin GIRARD Professeur - Mines Paris PSL – PERSEE center	robin.girard@minesparis.psl.eu
Prise d'information	Entretien conduit le 05/04/2023. Fiche validée le 22/10/2024.	
Ressources	https://gitlab.com/energytransition/buildingmodel	
Modèle général		
Finalité	L'objectif de cet outil est de fournir un modèle de simulation des consommations d'énergie des bâtiments s'appuyant au mieux sur les bases de données existantes pour participer à la planification énergétique à l'échelle locale, voire nationale.	
Type d'outil	BuildingModel est un outil de simulation énergétique des bâtiments à l'échelle territoriale fine.	
Champ de modélisation	Le modèle s'applique à la consommation énergétique des bâtiments.	
Usage type / périodicité	L'outil est destiné à un usage de simulation précisément adossée aux données réelles à l'échelle des territoires. Il permet par exemple de « rejouer » des Plans climat air énergie territoriaux (PCAET) en fournissant une simulation détaillée à l'échelle du territoire de l'évolution de la consommation, usage par usage et toutes énergies.	
Architecture	L'outil combine un volet de traitement statistique des données, permettant à partir de différentes bases de données et de méthodes d'inférence de caractériser le parc à l'échelle du bâtiment sur le territoire objet de la modélisation, et un volet de calcul des consommations d'énergie permettant une simulation. Il est développé en open source et fait appel pour sa pile technologique à Python 3 et Geopandas.	
Rythme d'actualisation	Le modèle est développé dans le cadre d'activités de recherche active aujourd'hui. Le modèle a été validé/calibré à l'échelle de la France sur les données locales de l'énergie pour le secteur résidentiel.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle recouvre en principe tous les bâtiments mais représente plus finement le secteur résidentiel, pour lequel les données disponibles sur les bâtiments et les usages sont beaucoup plus riches, que le secteur tertiaire.
	Usages	Le modèle traite a priori tous les usages, mais reste limité dans la caractérisation sur la base de données réelles de certains usages.
	Population	Le modèle part d'une description fine, à l'échelle bâtiment, de leur occupation par les ménages dans le résidentiel et par les actifs dans les locaux tertiaires, mais ne modélise pas explicitement des évolutions de la population, se concentrant sur la description physique des bâtiments et de leur usage.
Périmètre géograph.	Échelle	L'outil BuildingModel s'attache à décrire le parc à la maille du bâtiment lui-même, sur tout périmètre territorial choisi pour son application au sein de la France métropolitaine.
	Territoire	L'utilisation du modèle repose sur l'utilisation de données disponibles librement sur tout le territoire de la France métropolitaine. Le volume de calcul augmentant fortement avec l'étendue du territoire d'application, il est a été utilisé jusqu'à l'échelle nationale, notamment pour sa calibration (voir la publication désignant l'ensemble ici https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823004358) mais est plutôt destiné à l'usage de territoires à la maille communale ou intercommunale (utilisé pour analyser plusieurs PCAET : Grenoble, Nantes, Lille, Toulouse, dans la thèse de Martin RIT).
Périmètre temporel	Horizon	Le modèle de simulation ne fonctionne pas de façon dynamique. Il permet de reconstituer les consommations d'énergie actuelles et de projeter l'état des consommations moyennant une modification des données d'entrée. Dès lors, la simulation qu'il propose ne s'inscrit pas dans un horizon de temps particulier.
	Pas temporel	Le modèle calcule des consommations d'énergie des bâtiments pour une année dans les conditions de parc, d'usage et d'occupation qui lui sont proposées en entrée. Il ne calcule pas de courbes de charge au pas horaire mais fournit la puissance électrique maximale au cours de l'année.
Principes de calcul		
L'outil fonctionne de quelques bâtiments à l'échelle de la France à partir de données disponibles publiquement. Il fournit pour chaque bâtiment, par usage et par vecteur, une consommation d'énergie annuelle et une estimation de la pointe.. La méthodologie proposée combine le traitement de données géolocalisées avec des techniques d'inférence statistique pour obtenir une description de la géométrie de l'enveloppe de chaque bâtiment, de ses performances thermiques (enveloppe et systèmes) et de son occupation. Les performances thermiques sont obtenues à partir d'une méthodologie de traitement de la base DPE partagée en open-source et produite par Yassine Abdelouadoud. Cette description est ensuite utilisée comme entrée d'un modèle physique calculant les gains solaires, les pertes via l'enveloppe et la ventilation, la consommation du système de chauffage et la consommation d'énergie par les occupants.		
Concrètement, le calcul repose sur une intégration à l'échelle locale des données existantes. La collecte de données procède par inférences pour atteindre une caractérisation à la maille du bâtiment, en incorporant successivement :		
<ul style="list-style-type: none"> • des données comme celles de la BD TOPO de l'IGN, qui fournissent, dans chaque unité IRIS, le détail du nombre de logements, des matériaux des toits et des murs, de la hauteur de bâtiment, et bien sûr du type de résidence et de l'année de construction ; • des données issues des recensements conduits par l'INSEE, qui fournissent pour chaque type de résidence et année de construction, à la maille IRIS, des détails sur les systèmes de chauffage, la surface des logements et le nombre d'occupants ; 		

<ul style="list-style-type: none"> des données issues de la base des diagnostics de performance énergétique (DPE), qui fournissent pour chaque catégorie ainsi distinguée des informations sur le type de chauffage, le nombre de fenêtres, ou encore le système de renouvellement de l'air. <p>Le modèle peut également s'articuler avec la Base de données nationale des bâtiments (BDNB), qui cherche désormais à compiler l'essentiel des bases de données géospatialisées publiques relatives aux bâtiments (dont les précédentes).</p> <p>Sur la base de la caractérisation ainsi obtenue, le logiciel permet de simuler les consommations d'énergie sur le territoire concerné.</p> <p>La modélisation, dont la résolution s'effectue à l'échelle du bâtiment, implique de recourir à un modèle simplifié. L'outil calcule un besoin annuel sur la base d'un modèle statique simple de type 3CL-DPE, en modélisant notamment les échanges thermiques, tout en tenant compte des conditions climatiques et des effets d'ombrage entre les bâtiments.</p>		
Entrées	—	
Sorties	—	
Éléments de discussion		
Points forts	<p>L'outil BuildingModel s'inscrit dans une approche de cartographie exhaustive du parc de bâtiments, par contraste avec une approche de cartographie par archétype, représentée par exemple par le modèle ZEPHYR. Ces deux approches se caractérisent par une plus grande précision mais une plus grande lourdeur de calcul pour la première, et une précision moindre mais des temps de calcul plus légers pour la seconde.</p> <p>La spécificité de l'outil Building Model et de proposer une approche hybride par rapport aux deux principaux types de modèles de simulation énergétique existants : les modèles d'ingénierie, basés sur des modélisations physiques, et les modèles statistiques, basés sur des régressions statistiques. L'approche hybride consiste à prendre en compte des changements physiques tout en s'appuyant sur des bases de données.</p> <p>Cela permet d'intégrer, tout en restant au plus près de la réalité statistique, des éléments plus ou moins complexes de modélisation de phénomènes physiques à considérer, comme les qualités de l'enveloppe des bâtiments, le comportement plus ou moins détaillé des systèmes de chauffage, l'ensemble des transferts aérauliques (modélisation dynamique en pression et température, transfert entre zones), les effets liés à l'apport naturel en éclairage, le niveau d'occupation...</p>	
Questionnements et développements	<p>Sur les usages, le modèle croise des données de performance tirées de la base DPE avec des données sur le mode de chauffage tirées des recensements. La base DPE n'est pas parfaite, mais il n'y a pas mieux aujourd'hui pour décrire la performance thermique des bâtiments à l'échelle de dizaines de millions sur le territoire. Les défauts sont connus, et peuvent être en partie redressés par échantillonnage croisé avec d'anciennes bases. L'utilisation de cette référence permet en tous cas de représenter une consommation conventionnelle, et de simuler son évolution.</p> <p>Les consommations conventionnelles peuvent être corrigées en prenant en compte des informations telles que le niveau de revenu, pour tenir compte des usagers. De même, on sait à la maille IRIS, via le recensement, distinguer la typologie des logements, des petits appartements aux maisons individuelles, et tenir compte de facteurs associés à la typologie des occupants. L'ensemble reste un peu embryonnaire, mais présente le mérite de partir d'un calage sur les données réelles.</p> <p>Le modèle reconstitue les consommations sur la base de calculs conventionnels de type 3CL-DPE. En principe, l'outil peut appliquer cette méthode sur le résidentiel comme sur le tertiaire, mais en pratique il s'applique au seul résidentiel.</p> <p>Les besoins de froid ne sont pas couverts : ils peuvent l'être en théorie, mais l'information disponible sur les moyens de climatisation n'est pas suffisante (sauf à deviner où sont les pompes à chaleur réversibles...).</p> <p>Il y a également un travail sur les réseaux de gaz, pour identifier à partir des données en open data quand les systèmes de chauffage et l'ECS fonctionnent au gaz, mais il n'y a pas de modélisation du réseau de gaz lui-même. L'outil peut en revanche intégrer une contrainte par rapport à la pointe sur les pompes à chaleur (PAC), y compris les PAC hybrides (qui semblent une solution intéressante pour limiter la pointe électrique et limiter le besoin en gaz). Des travaux plus détaillés de modélisation de la performance des pompes à chaleur développés plus récemment (https://gitlab.com/antoine.rogau/generic-heatpump-model, publiés ici https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778824006066) pourraient être intégrés dans l'outil.</p> <p>Le modèle apporte une représentation de l'emprise au sol, les bâtiments étant décrits sous forme de polygones. La caractérisation à l'échelle bâtiment permet également de prendre en compte des effets tels que les apports solaires, ou l'adjacence d'autres bâtiments.</p>	
Besoins identifiés	Données	<p>De très nombreuses données sont d'ores et déjà disponibles et exploitées dans le cadre de l'outil BuildingModel. Toutefois le niveau de désagrégation et de précision des données statistiques, notamment sur le tertiaire et les usages dans ce secteur, ou plus spécifiquement sur la climatisation ne permettent pas aujourd'hui d'étendre le modèle à l'ensemble des bâtiments et des usages au niveau auquel il peut théoriquement les couvrir.</p> <p>Parmi les données qui seraient utiles figure la connaissance des points de connexion aux réseaux électrique et gaz, avec l'affectation selon la typologie des points de livraison.</p>
Méthode	<p>L'outil repose sur la volonté de réaliser un modèle simplifié pour une adaptation sur l'ensemble du territoire. Il peut toutefois être enrichi par des développements sur les modes de calcul visant à représenter les différents phénomènes physiques qu'il cherche à prendre en compte.</p> <p>Par ailleurs, l'objectif de l'outil étant explicitement de fournir un modèle énergétique validé sur les données réelles à l'échelle de la France, un enjeu fort de renforcement de l'outil réside dans la robustesse de la méthode de calibration. Ce renforcement se poursuit de manière continue, en élargissant la base des jeux de données que le modèle est en capacité d'utiliser (BDNB) et des logiciels de simulation incorporés. Le calibrage par un retour sur l'utilisation en prédition permet également d'améliorer la qualité de simulation. Dans le prolongement de cet effort, l'objectif est également d'introduire ce logiciel de simulation dans l'outil SHAPE-Optim.</p>	

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	Outil de modélisation de la consommation d'énergie pour les secteurs résidentiel et tertiaire permettant de projeter la consommation sur une année donnée, pour des territoires infranationaux, sur une logique bottom-up.
	Champs et paramètres	L'unité fonctionnelle du modèle est le bâtiment. Le modèle documente également l'emprise au sol du bâti. Les données de sortie sont la consommation énergétique
	Chaînages et bouclages	BuildingModel est lié au modèle SHAPE Optim , qui permet d'optimiser les stratégies de rénovation. Il peut donc d'ores et déjà fonctionner en écosystème. Il a également été utilisé pour analyser les renforcements du réseau de distribution pour l'intégration du PV, dans le cas du projet RaccoFlex. Il est actuellement utilisé pour la même question sur le véhicule électrique dans le cadre du projet PlaneTerr et de la thèse de Yoann Chiche.
	Questions et enjeux	Le caractère infranational du modèle pourrait lui permettre de documenter des enjeux de dynamiques territoriales différencierées.

A38. SHAPE-Optim (Mines Paris)

Outil		
Modèle / outil	SHAPE-Optim	<i>Modèle d'optimisation multicritères des stratégies de rénovation du parc résidentiel sur un territoire donné</i>
Porteur(s)	MINES Paris PSL - PERSEE center	
Développeur(s)	Antoine Rogeau, Martin Rit, Robin Girard	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Robin GIRARD Professeur - Mines Paris PSL – PERSEE center	robin.girard@minesparis.psl.eu
Prise d'information	Entretien conduit le 05/04/2023. Fiche validée le 22/10/2024.	
Ressources	https://www.theses.fr/2020UPSLM014 https://theses.fr/s268620 https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261924003192	
Modèle général		
Finalité	L'outil SHAPE-Optim vise à l'optimisation de la rénovation thermique des logements à l'échelle d'un parc de plusieurs milliers de bâtiments.	
Type d'outil	Outil d'optimisation des stratégies de rénovation	
Champ de modélisation	Le modèle s'applique à l'optimisation de la rénovation thermique du parc résidentiel.	
Usage type / périodicité	<p>L'outil vise à proposer une aide à la décision pour la rénovation énergétique territoriale capable de générer des plans d'actions optimisés à une maille bâtiment, en basant cette optimisation sur une modélisation fiable du contexte de la rénovation, tenant compte des consommations énergétiques des bâtiments, des systèmes de chauffage et des options de rénovation thermique.</p> <p>Il est construit pour baser l'ensemble de la méthode sur des données d'observation en exploitant les données accessibles aux territoires.</p> <p>L'optimisation est faite à l'échelle de plusieurs milliers de bâtiments conjointement avec des objectifs à la maille du territoire. Elle permet ainsi de modéliser par exemple les PCAET. C'est ce qui a été fait dans le dernier chapitre de la thèse de Martin Rit. Des techniques de clustering permettent de faire des projections sur la France entière.</p>	
Architecture	<p>Le modèle relève d'une architecture complexe, comprenant essentiellement trois composantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • une première partie porte sur la modélisation du parc: elle est consacrée à la caractérisation du parc et à la reconstitution de sa consommation d'énergie, • une deuxième partie concerne la modélisation des leviers: elle permet la simulation de stratégies d'action mettant en œuvre différentes options de rénovation thermique et de changement de système de chauffage, • la troisième relève de l'optimisation: elle intègre la formulation par l'opérateur du problème d'optimisation et sa résolution par un algorithme. <p>L'outil fait l'objet d'une implémentation sous Python qui est la propriété conjointe du CSTB et d'Armines.- Ecole des Mines de Paris.</p>	
Rythme d'actualisation	Ce modèle d'optimisation, qui peut aujourd'hui constituer une suite avec BuildingModel , a été développé avant ce dernier. Il est issu d'un travail de recherche mené dans le cadre du projet SHAPE (pour Simulations pHysiques pour l'Aide à la Planification Énergétique), soutenu par l'ADEME. L'outil est destiné à être mis à leur disposition, et pourra évoluer au gré des partenariats, sans calendrier prévisionnel particulier.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle porte spécifiquement sur les bâtiments résidentiels, qu'il traite à la maille unitaire du bâtiment. Mais l'optimisation se fait à l'échelle d'un territoire de plusieurs milliers de bâtiments. Des techniques de clustering permettent de faire des projections sur la France entière.
	Usages	Le modèle simule une consommation tous usages du parc de bâtiments qu'il considère, mais se concentre essentiellement sur la modélisation de la consommation de chauffage.
	Population	Le modèle part d'une description fine, à la maille du bâtiment, de leur occupation par les ménages dans le résidentiel et par les actifs dans les locaux tertiaires. Mais il se concentre sur la description physique des bâtiments et de leur usage et ne modélise pas explicitement des évolutions ou les comportements de la population.
Périmètre géograph.	Échelle	L'outil s'attache à décrire le parc à la maille du bâtiment lui-même, sur tout périmètre territorial choisi pour son application au sein de la France métropolitaine.
	Territoire	L'utilisation du modèle est dépendante de la disponibilité des données à l'échelle très fine à laquelle il travaille, disponibles a priori sur l'ensemble du territoire métropolitain. Son application est avant tout prévue pour des territoires à l'échelle de quelques milliers de bâtiments.
Périmètre temporel	Horizon	L'horizon de temps du modèle n'est pas fixé a priori mais déterminé par l'échéance que lui fixe l'opérateur pour appliquer l'optimisation.
	Pas temporel	Pour optimiser la stratégie sur la période qui lui est fixée par l'opérateur, le modèle calcule des consommations d'énergie et des émissions, des actions et des coûts d'investissement et de fonctionnement au pas annuel.
Principes de calcul	<p>Le modèle vise l'optimisation d'un parc bâti, en tenant compte des caractéristiques des bâtiments, des gestes de rénovation (incluant un couplage avec les systèmes de chauffage), des coûts engendrés et des contenus en CO₂ associés, tout en tenant compte des systèmes de distribution.</p> <p>Il réalise l'optimisation économique sur une trajectoire d'horizons, et peut par exemple tenir compte des rythmes de déploiement, ou comparer des stratégies de rénovation par geste ou globales.</p> <p>Comme BuildingModel, SHAPE-Optim se caractérise par le choix de s'appuyer sur les données disponibles pour développer une description détaillée collée au réel(par opposition à archétypale), permettant de prendre en compte des enjeux fins.</p> <p>À partir des bases de données existantes, il procède d'abord par inférence pour reconstituer un parc de bâtiments avec ses caractéristiques thermiques et le calibrer.</p>	

L'outil réalise ensuite une modélisation énergétique à la résolution du bâtiment. Il s'appuie pour construire un modèle du besoin énergétique annuel sur un modèle statique simple de type 3CL-DPE et modélise les apports et les échanges thermiques, tenant compte des conditions climatiques et des ombrages entre bâtiments. Il est calibré pour prendre en compte des comportements complexes des bâtiments (inertie, ponts thermiques...) et « entraîné » sur 9 ou 10 territoires et pour 12 conditions climatiques différentes.

L'étape suivante consiste à modéliser des stratégies d'intervention sur le parc, intégrant des actions de rénovation et des actions sur les systèmes de chauffage :

- pour la rénovation, le modèle construit des arbres de solutions techniques (à dire d'experts), établis pour chaque paroi et confrontés aux bases de retour d'expérience. Trois niveaux de performance finale peuvent être visés à travers leur mise en œuvre (RT existant au minimum, standard au niveau neuf 50%, et performant au niveau neuf 20%). Des coûts d'investissement, proportionnels à la surface à isoler avec un coefficient multicritères défini pour chaque bâtiment, sont associés à ces niveaux ;
- pour le chauffage, de la même manière, le modèle construit un arbre de solutions techniques en s'appuyant sur les systèmes observés dans le neuf et la rénovation et sur une caractérisation statistique des systèmes anciens en place. Il associe à chaque changement de système des coûts d'investissement et des coûts d'entretien, en lien avec les choix de vecteurs énergétiques et leur coût, comme avec la performance des systèmes. Il intègre parallèlement un effet sur le coût de chauffage des rénovations thermiques mises en œuvre.

La dernière étape proposée par l'outil est celle de l'optimisation : pour cela, l'opérateur formule le problème d'optimisation en définissant l'objectif (le périmètre sur lequel s'applique la minimisation et l'horizon qu'elle se fixe), les contraintes stratégiques à respecter (comme une cible d'émissions de CO₂) et les variables de décision (comme les types d'action mis en œuvre).

Entrées	—
Sorties	—

Éléments de discussion

Points forts	<p>Le modèle cherche, par son approche hybride, à réaliser un compromis entre précision et simplicité. Il vise une description exhaustive du parc permettant de représenter son hétérogénéité et de considérer des contraintes locales, tout en permettant à l'opérateur d'ajuster le niveau de détail, d'action et de contrainte.</p> <p>Une originalité du modèle réside dans la latitude proposée à l'utilisateur dans la formulation finale du problème d'optimisation. Celle-ci permet une résolution rapide en grande dimension et son évaluation selon plusieurs indicateurs. Elle permet également d'intégrer facilement de nouveaux leviers, ou de réaliser des variantes autour de la formulation de base.</p>
Questionnements et développements	<p>Le modèle ne permet aujourd'hui l'optimisation que sur un horizon de temps. Un développement permettant une optimisation multi-horizons est en cours.</p> <p>L'optimiseur fonctionne jusqu'à un volume d'environ 10.000 bâtiments : par une méthode de clustering qui ramènerait l'ensemble du parc bâti en France à l'équivalent de 10.000 bâtiments, le modèle peut s'appliquer à la France entière.</p> <p>L'optimisation peut être réalisée avec un coût du carbone, sous forme d'une optimisation linéaire sous contrainte. De plus, tout est prêt dans le modèle pour intégrer des signaux économiques – les effets prix, les aides – ou réglementaires, comme l'obligation de rénovation à l'occasion des mutations.</p> <p>Sur la question de la valeur des logements, le CSTB utilise notamment la base MAJIC, basée sur les impôts fonciers. Qu'il s'agisse de la valeur de départ du bien ou de la capacité des habitants à payer, l'outil peut intégrer deux types de données: celles relatives aux impôts, ou celles relatives aux transactions, compilées par les agences.</p> <p>Le modèle est souple à un enjeu comme la perte de valeur des biens au cours du temps. Il peut prendre en compte des questions relatives au financement. Il ne capte pas en revanche les questions de ressources humaines comme la disponibilité des compétences.</p> <p>Là où BuildingModel propose une simulation à parc constant, tous usages, SHAPE-Optim permet de traiter l'évolution du parc. Mais il n'intègre pas tous les éléments: par exemple, il ne prend pas en compte les réseaux de chaleur.</p> <p>Il est possible d'introduire dans le modèle des contraintes, par exemple sur le niveau de pointe à l'échelle des points HTA du réseau électrique. Il y a d'importants développements à envisager par exemple du côté des pompes à chaleur sur réseaux de chaleur, de la cogénération piloteable ou du stockage de chaleur.</p> <p>Tous les modèles utilisent BD TOPO, associée au cadastre, qui est l'une des trois grandes bases sources pour décrire les surfaces au sol, avec le recensement (et l'enquête logement, qui aurait pu être l'occasion de refaire ce qui a été fait à l'époque avec l'enquête Phébus), et la base MAJIC.</p> <p>Concernant les matériaux, les choix des matériaux peuvent indirectement être pris en compte sur la rénovation dans son bilan en analyse cycle de vie (ACV), mais le paramètre des matériaux n'est pas directement intégré aujourd'hui.</p> <p>L'outil modélise les consommations de chauffage en prenant en compte les apports solaires et les chroniques de température, au pas horaire, avec un bon couplage. Le pas de temps de la modélisation est horaire, mais le modèle ne produit qu'une sortie en énergie.</p> <p>L'impact d'un changement des températures de consigne se représente assez bien dans le modèle, mais plus largement la représentation de la sobriété reste pour l'instant peu développée dans l'outil. Des travaux sont en cours pour traiter la question du lien entre température de consigne et niveau de revenus. Mais l'optimisation ne prend pas en compte le niveau de revenus.</p> <p>La question se pose parallèlement du développement d'autres usages. Le modèle peut les intégrer en représentant par exemple une part de 5 % forfaitaire.</p> <p>Sur la température de consigne, des réflexions sont en cours avec Enedis pour essayer de trouver une modélisation plus fine, permettant de caler la dynamique (en lien avec l'appel de puissance aux points HTA). Cela peut par exemple passer par une modulation de la température de consigne dans la journée, mais elle présente peu de lien avec la question des revenus par exemple.</p> <p>Un des sujets importants concerne les données relatives à l'évolution des conditions météorologiques, pour les besoins de chaleur mais aussi de froid. Il faut distinguer entre données d'entrée et données</p>

calibrées: la modélisation dans des données climatiques a besoin, pour faire un calcul d'optimisation pour un scénario donné, d'un jeu de données stochastique.

Il y a aussi un enjeu de tenue des bâtiments. En particulier, à l'échelle du parc, on n'a pas nécessairement les informations pour distinguer bons et mauvais bâtiments du point de vue des besoins de froid. On ne dispose pas non plus de données sur les protections solaires, ou de données très partielles sur l'exposition au sud ou non des surfaces vitrées, etc. Autant c'est la thermosensibilité hivernale qui se voit au national, autant les besoins de climatisation l'été peuvent se voir au niveau local.

Enfin, les questions d'évolution dans la répartition de la population ne sont pas ou peu prises en compte. La question des migrations saisonnières, par exemple, n'est pas un gros enjeu dans **BuildingModel** qui travaille sur des données annuelles, mais elle peut l'être dans des modèles qui regardent les effets de pointe au niveau local comme **MOSAIC** ou qui cherchent une optimisation comme **SHAPE-Optim**. Dans ce modèle se pose en corollaire la question de la rénovation appliquée aux résidences secondaires.

Une autre question importante concerne le développement du télétravail. Il n'est pas modélisé explicitement. L'outil est souple et pourrait prendre ce facteur en compte, à condition de pouvoir renseigner les paramètres dont il dispose pour cela avec les bonnes données. L'enjeu serait l'optimisation du télétravail par rapport au parc bâti résidentiel et tertiaire.

Besoins identifiés	Données	—
	Méthode	—

Positionnement dans la cartographie

	<i>Outils et modèles</i>	Outil de modélisation de la consommation d'énergie pour les secteurs résidentiel permettant d'optimiser une trajectoire de rénovation, dans une logique bottom-up.
	<i>Champs et paramètres</i>	L'unité fonctionnelle du modèle est le logement
	<i>Chaînages et bouclages</i>	SHAPE Optim est lié au modèle BuildingModel , qui permet de documenter la consommation d'énergie du parc de bâtiment. Il peut donc d'ores et déjà fonctionner en écosystème.
	<i>Questions et enjeux</i>	La finalité d'optimisation du modèle peut être mise à profit pour documenter les arbitrages entre les multiples objectifs de la transition (économiques, émissions GES, gestion de la pointe électrique...).

A39. ThreeME (OFCE / ADEME / NOE)

Outil		
Modèle / outil	ThreeME	
Porteur(s)	ADEME	
Développeur(s)	ADEME, OFCE, NEO (Netherlands Economic Observatory)	<i>Le modèle ThreeMe est un modèle d'équilibre général calculable permettant d'évaluer les impacts macroéconomiques sur l'économie française des politiques de transition écologique (dont celles ayant un impact sur le prix de l'énergie pour les ménages, et donc leurs arbitrages logement) à horizon 2050</i>
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Gael CALLONNEC Économiste, Service Economie Finance – ADEME Alma MONSERAND Économiste, Service Economie Finance – ADEME	gael.callonnet@ademe.fr alma.monserand@ademe.fr
Prise d'information	Fiche validée le 26/09/2024	
Ressources	https://www.threeme.org/ https://infos.ademe.fr/lettre-strategie-juillet-2022/threeme-un-modele-pertinent-pour-levaluation-environnementale/	
Modèle général		
Finalité	L'objectif principal de ThreeME est d'évaluer l'impact à moyen et long terme des politiques environnementales et énergétiques sur l'économie française. Il vise notamment à répondre aux questions suivantes : quelle est la réduction attendue des émissions de carbone pour chaque mesure politique ? Quels sont les secteurs qui vont croître ou décroître en conséquence ?	
Type d'outil	<p>ThreeME est un modèle d'équilibre général calculable. Il prend en compte les interactions et les rétroactions entre l'offre et la demande pour l'ensemble de l'économie française. La demande (consommation, investissement, exportations) dénote l'offre (production intérieure et importations). L'offre désigne en retour la demande à travers les revenus générés par les facteurs de production (travail, capital, énergie, matériaux, terre, etc.).</p> <p>La dynamique des prix est le moteur des mécanismes de substitution du modèle. L'évolution des prix relatifs entre les biens importés et les biens nationaux définit la répartition entre les produits importés et les produits nationaux pour satisfaire la demande interne (consommation et investissements) et externe (exportations). L'évolution des prix relatifs entre les types de biens et de services définit la structure de la consommation de l'économie. Important pour l'analyse des politiques environnementales et énergétiques, il définit la part de chaque énergie dans les consommations (intermédiaires et finales).</p>	
Champ de modélisation	Impacts macroéconomiques de la transition énergétique	
Usage type / périodicité	<p>ThreeME est utilisé pour la modélisation des scénarios prospectifs ADEME (Visions 2030-2050, Transition(s) 2050). Il est par ailleurs utilisé – à l'instar du modèle IMACLIM-R du CIREN – par le ministère de la Transition écologique afin de réaliser l'évaluation des Stratégies Nationales Bas Carbone.</p> <p>Le modèle a été également appliqué dans diverses études françaises (régionales), mais aussi dans des études mexicaines, indonésiennes, tunisiennes et néerlandaises, et il est continuellement adapté à d'autres pays. À titre d'exemple, il a été utilisé en 2023 pour analyser les effets macroéconomiques du bouclier tarifaire.</p>	
Architecture	Programmation en R, Open-source	
Rythme d'actualisation	Continuelle. Version 3	
Périmètre technique	Bâtiments	Le secteur Résidentiel est représenté explicitement dans un Module Logement. Le secteur tertiaire est intégré de manière implicite via la consommation de services des ménages
	Usages	Chauffage
	Population	—
Périmètre géograph.	Échelle	Nationale
	Territoire	France métropolitaine
Périmètre temporel	Horizon	2050
	Pas temporel	Annuel
Principes de calcul	<p>Principes généraux</p> <p>Le modèle décrit précisément les consommations d'énergie (modèle hybride), les contraintes de financement pesant sur l'investissement (modèle néokeynésien) et les transferts d'activités économiques (modèle multisectoriel)</p> <p>ThreeME est hybride : le modèle retrace avec précision et réalisme l'ensemble des consommations d'énergie. Les agents investissent dans la transition uniquement si cela est rentable pour eux, étant donné les coûts d'acquisition mais également de l'énergie. Pour les ménages, les évolutions des parcs immobilier et automobile sont finement modélisées pour 7 classes énergétiques. Les entreprises peuvent aussi financer des travaux d'efficacité énergétique ou de modification du mix.</p> <p>ThreeME est néokeynésien : Ces investissements verts sont essentiellement financés par emprunt (hypothèse réaliste), et non en puisant dans un stock d'épargne préalable (modèle Walrassien). De ce fait, une hausse d'investissement dans la transition ne s'opère pas nécessairement au détriment d'autres investissements productifs. L'effet d'éviction¹ est très faible, rendant possible un multiplicateur keynésien, si les secteurs de la transition s'y prêtent.</p> <p>ThreeME est multisectoriel : Il permet donc d'apprécier les effets économiques d'un transfert d'activité d'un secteur à l'autre, de la route vers le rail par exemple. Or, les secteurs n'ont pas tous la même propension à importer ni la même intensité en emploi. Un transfert d'activité n'est donc pas neutre sur la croissance.</p> <p>ThreeME est un modèle modulaire. Le modélisateur peut facilement activer et désactiver différents modules pour adapter la complexité du modèle aux besoins de l'étude. Cela permet non seulement</p>	

<p>une grande transparence dans les hypothèses de modélisation, mais aussi une meilleure interprétation des résultats de la modélisation et donc des résultats plus robustes.</p> <p>Module Logement</p> <p>Le modèle contient un module permettant de générer une dynamique du stock de logements par classe énergétique (DPE). Le calcul central du module est le passage d'une partie du parc de logements d'une classe énergétique à une autre, associé à une matrice de coût par saut de classe. L'équipement de chauffage n'est pas explicite. C'est le temps de retour sur investissement qui permet de « déclencher » des rénovations.</p> <p>Les dépenses de logement sont ventilées entre les dépenses énergétiques et les dépenses d'investissement, puis par type d'énergie. Elles incluent les dépenses liées à la dette (intérêts et remboursement), l'investissement payé en espèces et le coût de l'énergie.</p>		
Entrées	<p>Outre les entrées générales au modèle (prix des énergies, démographie...), les calculs du module Logement reposent sur les variables suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Élasticité de substitution entre les dépenses énergétiques et les dépenses de logement • Élasticité de substitution entre les investissements et les dépenses dans le domaine du logement énergétique • Elasticité de substitution entre la consommation énergétique et la surface de logement par habitant dans les immeubles par classe énergétique • Dépenses de logement (en valeur) • Dépenses de logement dans les bâtiments par classe énergétique (en valeur) • Durée du prêt pour le logement par classe énergétique • Prix de la consommation d'énergie liée au logement • Prix de la dépense énergétique globale liée au logement • Prix de l'ensemble des dépenses énergétiques liées au logement • Prix des dépenses d'investissement liées au logement • Part de la consommation d'énergie dans la consommation totale d'énergie liée au logement • Part des dépenses d'investissement dans le logement dans le total des dépenses de logement • Effet de substitution induit par un changement de prix relatif entre les dépenses d'investissement et les dépenses énergétiques du logement 	
Sorties	<p>Module Logement :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consommation finale des ménages liée au logement en valeur • Consommation finale des ménages en produits énergétiques liés au logement • Consommation finale d'énergie des ménages liée au logement en valeur • Consommation finale des ménages liée à l'investissement en logement en valeur 	
<h3>Éléments de discussion</h3>		
Points forts	<p>Le modèle permet d'intégrer les arbitrages économiques des ménages dans des dynamiques macro-économiques générales. Il permet de documenter les interactions entre les consommations d'énergie et décisions économiques des ménages sur leur logement (et leur mode de transport) et les grands agrégats macro-économiques.</p>	
Questionnements et développements	<p>Module Logement :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour éviter des effets trop forts, le modèle introduit, par classe, un taux de réhab max et min dont le calibrage est difficile • Le module documente les consommations de chauffage et non l'ensemble des 5 usages DPE • Il existe une incertitude associée à la donnée « état du parc en DPE », la source de données principale pour produire cette information étant la base DPE de l'ADEME, qui est par nature non représentative du parc (puisque elle ne capte que les DPE des logements neufs et ceux des logements faisant l'objet de transactions) et intègre une part importante d'incertitude liée aux DPE eux-mêmes. • La focalisation récente de la politique publique de rénovation sur la décarbonation entraîne une focalisation sur les logements chauffés au gaz et au fuel, qui ne sont pas toujours équivalents aux passoires thermiques, ce qui peut rendre l'identification des logements concernés par la politique difficile dans le modèle • Il est plus difficile pour un modèle de ce type de représenter des politiques publiques qui ne passent pas par le signal prix (ex: interdiction de location) 	
Besoins identifiés	Données	Le module Logement nécessite une mise à jour constante sur des données d'entrée comme le prix de la rénovation ou la performance énergétique des logements neufs
	Méthode	Un couplage explicite avec le modèle Menfis (ADEME-CSTB) permettra d'améliorer les équations de prise de décision des ménages
<h3>Positionnement dans la cartographie</h3>		
	Outils et modèles	Modèle d'équilibre général calculable permettant d'évaluer les impacts macroéconomiques sur l'économie française des politiques de transition écologique à horizon 2050 au pas annuel. Il couvre en détail le secteur résidentiel et l'usage chauffage.
	Champs et paramètres	En ce qui concerne le bâtiment, les principales unités fonctionnelles du modèle central sont les prix des énergies, les coûts d'investissement, le parc de logement par DPE, et le ménage représentatif.
	Chaînages et bouclages	Pour le bâtiment, le modèle a été utilisé dans Transition(s) 2050 en chaînage avec les modèles ANTONIO et VIVALDI qui lui ont fourni les volumes d'activité du secteur. Il a ensuite nourri le modèle MatMat permettant d'établir l'empreinte carbone et matière des scénarios, ainsi que le modèle Matisse permettant de sortir du ménage représentatif et d'évaluer les effets distributifs selon différents types de ménages (revenus, densité urbaine, zone géographique). A terme, on pourrait imaginer l'utiliser en bouclage (une première version de scénario produite avec ANTONIO et VIVALDI pourrait alimenter ThreeMe qui permettrait en retour d'améliorer la

modélisation physique de ces deux modèles en y intégrant des éléments de dynamique économique sur les services ou des évolutions plus « lissées » de dynamiques de rénovation).



Questions et enjeux

Le modèle répond aux enjeux de documentation des interactions entre les décisions économiques des ménages pour leur logement (consommation d'énergie, investissement dans la rénovation...) et les évolutions macro-économiques françaises, ainsi que les impacts de la transition sur le budget des ménages. Il est un des rares modèles de l'écosystème étudié à analyser la dimension économique de la transition pour le secteur résidentiel.

A40. BAT-ADAPT (OID)

Outil		
Modèle / outil	BAT-ADAPT	<i>Le modèle permet d'analyser l'évolution de l'exposition d'un bâtiment ou d'un ensemble de bâtiments aux aléas climatiques à l'horizon 2100. Il offre la possibilité de réaliser un diagnostic du niveau de vulnérabilité de ces bâtiments et d'élaborer une stratégie d'adaptation en s'appuyant sur un catalogue de solutions adaptatives.</i>
Porteur(s)	Observatoire de l'Immobilier Durable	
Développeur(s)	Observatoire de l'Immobilier Durable	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Pauline VILAIN-CARLOTTI Cheffe de projet Morgane MOULLIE Cheffe de projet senior Cristhian Andres MOLINA CALDERON Chef de projets	pauline.vilain@o-immobilierdurable.fr morgane.moullie@o-immobilierdurable.fr cristhian.molina@o-immobilierdurable.fr
Prise d'information	Fiche rédigée sur la base des informations disponibles sur Internet Fiche validée le 19/09/2024	
Ressources	https://r4re.resilience-for-real-estate.com/ https://resources.r4re.resilience-for-real-estate.com/documentation/batadapt_referentiel.pdf https://resources.taloen.fr/resources/documents/9754_240304_OID_EcoTRACC.pdf	
Modèle général		
Finalité	Resilience for Real Estate (R4RE) est une plateforme dédiée à l'analyse de la résilience face aux enjeux du climat et de la biodiversité pour les échelles bâtiment et territoire. La plateforme propose plusieurs outils : Bat-ADAPT, pour l'analyse prospective des risques climatiques ; Bat-ADAPT Territoires, destiné aux collectivités ; et BIODI-Bat, pour l'évaluation des enjeux liés à la biodiversité. Parmi ces outils, seuls Bat-ADAPT et Bat-ADAPT Territoires intègrent une dimension prospective.	
Type d'outil	Bottom-up	
Champ de modélisation		
Usage type / périodicité	Bat-ADAPT permet d'obtenir (à l'heure actuelle et en prospective) différentes analyses sur un bâtiment (ou un groupe de bâtiment) et les risques liés aux aléas climatiques associés à son lieu d'implantation. L'outil a été construit dans le but de répondre aux enjeux de la Taxinomie Européenne. Pour répondre précisément aux critères du DNSH1 « adaptation », il présente les différents risques géophysiques qui concernent spécifiquement le secteur du bâtiment et que le changement climatique tend à aggraver. L'usager peut accéder aux données sur les différentes catégories d'aléas naturels imposées par la Taxinomie et auxquelles le secteur est soumis. La couche logicielle de l'outil permet également de mener des analyses à l'échelle de certains territoires (Bat-ADAPT Territoires) ou de l'ensemble des bâtiments français, ce qui a été fait dans le cadre de Transition(s) 2050 et du projet ECO TRACC.	
Architecture	Ensemble de cartes d'aléas prospectifs mise à disposition via une plateforme en ligne	
Rythme d'actualisation	Régulière, en fonction des nouvelles données d'aléas climatiques disponibles	
Périmètre technique	Bâtiments Usages Population	Résidentiel, tertiaire — —
Périmètre géograph.	Échelle Territoire	L'analyse peut se faire à l'échelle d'un seul bâtiment, mais également sur un groupe de bâtiments (cette fonctionnalité est notamment utile pour les gestionnaires de patrimoine immobilier) France hexagonale, Europe continentale
Périmètre temporel	Horizon Pas temporel	Pour la France : 2090 Pour la France : 2020, 2030, 2040, 2050, 2070, 2090
Principes de calcul	L'outil BAT-ADAPT croise l'information sur : <ul style="list-style-type: none"> - Exposition : un score d'exposition au risque climatique est donné par l'outil. Il permet, en fonction du lieu d'implantation du bâtiment, de connaître le niveau d'exposition à un aléa donné (parmi ceux disponibles sur la plateforme). Ce score d'exposition est donné par rapport à l'ensemble des données, c'est-à-dire qu'il met en perspective l'exposition dans une localisation précise par rapport au comportement existant de l'aléa dans l'ensemble de la zone couverte (France hexagonale ou Europe continentale). L'exposition est donc pondérée et normalisée, avec 0 % signifiant l'exposition minimal rencontré sur la zone et 100 % signifiant l'exposition maximal, pour la période de référence de 2020 à 2100, en fonction de 3 scénarios d'émissions. Le scénario business as usual correspond au scénario RCP 8.5 ou SSP 8.5 (selon le modèle dont il s'agit, France ou Europe). Les tests sur les scénarios RCP 4.5 et 2.6 qui sont respectivement des scénarios de maintien ou de réduction d'émissions sont présentés sur R4RE. - Vulnérabilité : un score de vulnérabilité du bâtiment vis-à-vis d'un aléa donné est mis à disposition. Il dépend des caractéristiques techniques et d'usage du bâtiment renseignées dans le formulaire et est déterminé à l'aide d'une matrice de vulnérabilité propre à chaque aléa. La fiabilité du score de vulnérabilité est dépendante du niveau de remplissage du formulaire sur les caractéristiques du bâtiment. L'absence de complétion du formulaire conduira à un score de vulnérabilité maximal par défaut. Un modèle d'analyse croisée permet d'obtenir une information globale sur le risque auquel est soumis le bâtiment, eu égard à la combinaison de sa vulnérabilité et de son exposition. Ce score est donné selon 5 modalités : très faible, faible, moyen, fort, très fort.	
	Les aléas suivants sont ou seront couverts par l'outil Bat-ADAPT de R4RE :	

	<ul style="list-style-type: none"> - Chaleurs (stress thermique et vagues de chaleur) - Sécheresses - Précipitations et inondations (fluviales, remontées de nappes, ...) - Dynamiques littorales (érosion côtière, submersion marine, élévation du niveau de la mer) - Tempêtes et vents violents - Feux de forêts - Grands froids - Mouvements de terrain 	
Entrées	<p>Les sources des données utilisées pour les calculs de risques climatiques sont : l'atlas interactif du GIEC, Copernicus et les données Drias et Drias-eau pour les données prospectives et le CRNM, Georisque, les plans de préventions des risques, la base de données CATNAT pour les données de vulnérabilité du territoire.</p> <p>L'analyse d'exposition du bâtiment aux risques repose sur l'adresse de celui-ci.</p> <p>Pour obtenir une analyse de vulnérabilité du bâtiment, des caractéristiques techniques et d'usage à propos de celui-ci doivent être données. Il s'agit d'informations sur l'enveloppe, le plancher, l'environnement du bâti, les équipements présents, l'usage du bâtiment, etc R4RE préremplit automatiquement des profils de bâtiments prédéfinis par défaut (catégories définies grâce aux fiches du Programme PROFEEL Maisons Individuelles, Logements Collectifs & Petites Unités Tertiaires et après consultations avec un panel d'experts pour le grand tertiaire) lorsque les caractéristiques précises ne sont pas connues. Ainsi, il suffit de fournir des informations pour une dizaine de caractéristiques techniques pour que Bat-ADAPT détermine un profil par défaut pour les bâtiments</p>	
Sorties	<p>Score d'analyse croisée exposition x vulnérabilité</p> <p>Score de contribution à l'adaptation</p>	
Éléments de discussion		
Points forts	<p>La plateforme permet de disposer d'un premier niveau d'analyse prospective des risques climatiques associé à un bâtiment (ou un groupe de bâtiments). En rassemblant l'ensemble des aléas pour lesquels des données sont disponibles dans un seul outil, elle permet une analyse multicritère et de prioriser des actions d'adaptation dans le bâtiment.</p>	
Questionnements et développements	<p>Le rythme de développement dépend de la mise à disposition des données de risques. Par exemple, un indicateur pour les Tempêtes et vents violents sera ajouté lorsqu'un indicateur permettant de refléter une intensification des vents sera disponible en open source. Le travail de réflexion commune avec les scientifiques de MétéoFrance se poursuit. C'est également le cas pour les aléas Dynamiques littorales et Mouvements de terrain, pour lesquelles les recherches de données sont en cours ainsi que la concertation avec des experts techniques et scientifiques, tant sur l'exposition au risque que sur la vulnérabilité des bâtiments</p>	
Besoins identifiés	Données	
	Méthode	
Positionnement dans la cartographie		
	Outils et modèles	<p>Il s'agit d'un modèle bottom-up, à visée exploratoire, basé sur une description des principaux risques climatiques pour les bâtiments. Il prend en compte les bâtiments résidentiels et tertiaires sur le territoire de la France métropolitaine, avec la possibilité d'étendre l'analyse à des bâtiments situés en Europe. Le modèle couvre différents horizons temporels, de 2030 à 2100, et intègre les scénarios d'émissions RCP et SSP du GIEC.</p>
	Champs et paramètres	<p>L'unité fonctionnelle du modèle est l'emprise au sol du bâtiment. Des paramètres décrivant le comportement de l'aléa sont utilisés comme indicateurs prospectifs (climatiques) et non prospectifs (territoriaux). Ces indicateurs servent à analyser l'exposition, laquelle est confrontée aux caractéristiques du bâtiment dans le cadre de l'analyse de vulnérabilité.</p>
	Chaînages et bouclages	<p>La couche logicielle du modèle a été intégrée dans la suite des outils de modélisation utilisés par l'ADEME pour Transition(s) 2050, elle a permis de documenter l'évolution de l'exposition du parc immobilier à l'horizon 2050. On pourrait imaginer l'utiliser pour mieux qualifier les besoins de travaux d'adaptation à inclure dans des scénarios prospectifs, pour quantifier des besoins d'investissement et de main d'œuvre associés.</p>
	Questions et enjeux	<p>Le modèle documente les enjeux d'adaptation au changement climatique, et pourrait participer à une réflexion plus large sur la manière dont le bâtiment pourrait répondre à un éventuel cumul de crises systémiques (crise climatique, sanitaire, économique...) en fournissant des informations sur l'aspect climatique.</p>

A41. Outil étude bâtiment (POUGET Consultants / Carbone 4)

Outil		
Modèle / outil	Outil étude bâtiment (pas de nom)	Méthodologie de projection de construction et de rénovation du secteur résidentiel afin de documenter une trajectoire d'atteinte des objectifs de la SNBC en 2050.
Porteur(s)	POUGET Consultants / Carbone 4	
Développeur(s)	POUGET Consultants	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Charles ARQUIN Associé, Responsable Pôle Rénovation – POUGET Consultants Julien PARC Responsable activité études prospectives, Pôle Rénovation - POUGET Consultants Julie DAUNAY Responsable Pôle bâtiment-immobilier - Carbone 4 Aïda TAZI Co-responsable Pôle immobilier - Carbone 4	charles.arquin@pouget-consultants.fr julien.parc@pouget-consultants.fr julie.daunay@carbone4.com aida.tazi@carbone4.com
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 28/03/2023 – enrichie par échange mail avec le porteur le 29/03/2023. Revue et complétée par les auteurs le 13/10/2023. Fiche validée le 16/09/2024.	
Ressources	Étude : http://www.pouget-consultants.eu/wp-content/uploads/2020/01/20200117_Publication-Batiment-SNBC_vDEF4.pdf Mise à jour de la démarche : https://www.promotelec.com/document/conditions-du-secteur-residentiel-pour-atteindre-la-neutralite-carbone-telle-que-definie-dans-la-snbc/	
Modèle général		
Finalité	La modélisation considérée ici est celle qui a soutenu le rapport de POUGET Consultants et Carbone 4 intitulé « Neutralité et logements – À quelles conditions le secteur résidentiel peut-il atteindre la neutralité carbone telle que définie dans la SNBC ? »	
Type d'outil	Il ne s'agit pas d'un outil au sens strict d'un modèle ou assimilé permettant de renouveler, dans différents contextes ou au fil du temps, un exercice de projection, mais d'un dispositif spécifiquement développé pour les besoins de l'étude mentionnée.	
Champ de modélisation	La démarche porte sur la simulation de l'évolution de la consommation d'énergie du secteur résidentiel sous contrainte carbone.	
Usage type / périodicité	L'objectif de l'étude, et par conséquent de la modélisation sous-jacente était de montrer comment le secteur résidentiel peut parvenir à la neutralité carbone – telle que décrite dans la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) – en tenant compte des spécificités du parc.	
Architecture	La construction neuve est modélisée avec le rythme et le mix énergétique d'équipement en chauffage des nouveaux logements retenus dans la SNBC, en ajustant le niveau de performance visé (en lien avec des hypothèses de renforcement de la réglementation). La rénovation du parc est modélisée de façon à rénover l'ensemble du parc existant (avant 2000) sur l'ensemble de la période, avec des niveaux de performance « réalistes » tenant compte de la typologie des bâtiments, et notamment des contraintes patrimoniales (façade remarquable, etc.) comme des contraintes techniques (terre-plein, etc.). Les changements de mix énergétique pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS), en lien avec les rénovations ou non, sont également modélisés. Les bouquets de travaux et leur nombre sont ajustés pour que le parc atteigne un niveau BBC en moyenne en 2050, et de façon générale respecte les objectifs de la SNBC.	
Rythme d'actualisation	Ce rapport fait suite notamment à un rapport de 2017 réalisé dans le cadre du programme PACTE. De plus, ce travail a été actualisé à deux reprises, d'abord pour prendre en compte l'application de la RE2020 (juillet 2021), puis pour intégrer des scénarios complémentaires en considérant une majorité de rénovations par gestes (décembre 2022). Ces deux mises à jour n'ont pas donné lieu à de nouvelles version du rapport mais ont fait l'objet de présentations à EnerMeeting et aux 60 ans de Promotelec (le support de la première présentation est disponible (cf ci-dessus), celui de la seconde ne l'est pas au moment où cette fiche est rédigée).	
Périmètre technique	Bâtiments	La démarche couvre le parc résidentiel, et ne porte que sur les résidences principales.
	Usages	La modélisation porte essentiellement sur le chauffage et l'ECS. Pour les besoins de l'évaluation globale, les autres usages du secteur résidentiel (cuisson, climatisation, électricité spécifique...) sont pris en compte, mais ne sont modélisés que de façon globale en reprenant les hypothèses retenues dans le scénario de la SNBC.
	Population	La population est prise en compte à travers le besoin en logements (donc la construction neuve), mais pas de façon explicite.
Périmètre géograph.	Échelle	La démarche intègre une segmentation du parc en catégories, mais celles-ci sont décrites de façon agrégée à l'échelle nationale.
	Territoire	L'évaluation porte sur la France métropolitaine, Corse non comprise.
Périmètre temporel	Horizon	En cohérence avec l'objectif et l'horizon de la SNBC, la modélisation projette l'évolution à 2050.
	Pas temporel	La modélisation se concentre sur la caractérisation du point de départ, calé sur les données de 2015, et du point d'arrivée, fixé à 2050. La démarche décrit, par simplification, une linéarisation des indicateurs annuels entre ces deux jalons.
Principes de calcul	Le parc résidentiel existant a été modélisé à partir d'une typologie distinguant onze catégories de bâtiments, soit 5 catégories pour les maisons individuelles et 6 pour les logements collectifs, représentatives de la diversité du parc de logements français en termes de période constructive, taille, performance énergétique initiale, etc.	

<p>Pour chacune de ces catégories, plusieurs scénarios de rénovation de l'enveloppe et de changement des équipements (chauffage, ECS et ventilation) ont été modélisés avec le moteur ThCE-Ex en tenant compte de la réglementation thermique existante, sous 3 climats métropolitains représentatifs.</p>	
Entrées	<p>La modélisation intègre en données d'entrée une description du parc de résidences principales en 2015, décrite en surface totale répartie entre 11 catégories. Les données d'entrée portent ensuite sur les différentes hypothèses d'évolution du parc et des usages, calées lorsque celle-ci est explicite sur les hypothèses de la SNBC. Ceci inclut des hypothèses sur les constructions neuves, sur les niveaux de performance du neuf et sur l'application d'actions de rénovation, sur le choix des systèmes énergétiques pour le chauffage et l'ECS, et sur l'évolution des consommations relatives aux autres usages.</p> <p>En particulier, le niveau de rénovation est fixé de façon à pouvoir rénover 100 % du parc existant avant 2050, et le niveau de performance du neuf est ajusté de façon à caractériser le besoin d'évolution de la réglementation (renforcement de la RE2020).</p> <p>Par ailleurs, pour le calcul économique, la démarche prend en compte des prix des énergies, des coûts de rénovation, d'équipement et des coûts de maintenance unitaires.</p>
Sorties	<p>Le résultat porte en premier lieu sur les consommations énergétiques, en distinguant les consommations d'énergie finale et primaire, au national et par catégorie de bâtiment.</p> <p>La modélisation fournit ensuite un calcul des émissions de gaz à effet de serre du secteur résidentiel, au scope 1 et au scope 2.</p> <p>Enfin, la démarche permet une évaluation économique des factures énergétiques des ménages, couvrant les 5 usages pris en compte par la réglementation, ainsi que des coûts de maintenance.</p>
<h3>Éléments de discussion</h3>	
Points forts	<p>La démarche, en lien avec la problématique centrale de l'étude, s'est notamment concentrée sur l'approche différenciée des bouquets de travaux « réalistes » selon les typologies architecturales.</p>
Questionnements et développements	<p>Il n'y a à ce stade pas de suite prévue dans ce cadre.</p> <p>Au-delà d'une projection nationale, l'approche a pu être appliquée à plusieurs sous-secteurs ou déclinée à l'échelle de bailleurs sociaux pour l'établissement de stratégie patrimoniale, souvent sous la forme d'outils développés pour ces besoins spécifiques, mais éventuellement reproductibles.</p> <p>Dans un autre registre, il faut noter que les calculs ont été réalisés en considérant un climat actuel, faute de capacité à prendre en compte une évolution du climat, même si cela est limitatif.</p>
Besoins identifiés	<p>La démarche souligne l'intérêt de développer des objectifs cibles par segment (pour le logement social, le parc privé, ...) dans la SNBC.</p> <p>Elle montre également l'intérêt qu'il y aurait à pouvoir s'appuyer sur des corrections entre les consommations conventionnelles et des consommations réelles mieux caractérisées.</p> <p>Enfin, il faudrait pour être en mesure d'élargir le champ des options considérées disposer de données d'évaluation de leur impact sur les consommations : cela concerne notamment l'ensemble des actions de sobriété, comme le renforcement des actions de suivi d'exploitation et d'accompagnement aux usages.</p>
Méthode	—
<h3>Positionnement dans la cartographie</h3>	
 Outils et modèles	<p>Il s'agit d'une méthodologie de calcul portant sur le parc de résidences principales, à l'échelle de la France métropolitaine (hors Corse) et projetant les consommations d'énergie et émissions carbone à 2050 dans une logique normative (atteinte de la cible SNBC) et bottom-up.</p>
 Champs et paramètres	<p>L'unité fonctionnelle de base de la méthodologie est le logement, et la sortie principale la consommation d'énergie.</p>
 Chaînages et bouclages	<p>La méthodologie utilisée n'est chainée ou bouclée avec aucun autre modèle.</p>
 Questions et enjeux	<p>L'apport principal de l'étude est l'explicitation et la documentation d'une trajectoire d'atteinte des objectifs de la SNBC. La méthodologie développée ne se prête pas à l'exploration d'autres enjeux prospectifs.</p>

A42. TETE (Réseau Action Climat / ADEME)

Outil		
Modèle / outil	TETE	<i>L'outil TETE a pour objectif d'évaluer les emplois créés et détruits par les politiques climat-énergie, et, notamment, dans le secteur du bâtiment, par la construction et la rénovation</i>
Porteur(s)	Réseau Action Climat / ADEME	
Développeur(s)	Réseau Action Climat, ADEME et CIRED	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Philippe QUIRION Économiste, directeur de recherche CNRS - CIRED	philippe.quirion@cnrs.fr
Prise d'information	Fiche rédigée par les auteurs le 22/112/2023. Fiche validée le 27/09/2024.	
Ressources	https://territoires-emplois.org https://www.ofce.sciences-po.fr/pdf/revue/01-176OFCE.pdf	
Modèle général		
Finalité	L'outil TETE (Transition écologique territoire emploi) est un outil destiné à évaluer les emplois créés et détruits par les politiques climat-énergie à l'échelle nationale et territoriale. Cet outil est mis à disposition gratuitement en open source via un site internet dédié.	
Type d'outil	Il s'agit d'un modèle de simulation bottom-up, techno-explicite, des trajectoires d'emplois associés aux transformations induites par la transition énergétique.	
Champ de modélisation	Ce modèle porte sur l'évaluation du contenu en emplois des scénarios de transition énergétique, sur l'ensemble des secteurs directement impactés par ces scénarios, au premier rang desquels le bâtiment.	
Usage type / périodicité	L'outil a été développé conjointement par le Réseau Action Climat et l'ADEME, avec la contribution de Philippe QUIRION du CIRED, pour être mis à disposition des collectivités et d'autres acteurs. Il fait plus ou moins régulièrement l'objet d'importantes mises à jour. La version 4, actuellement proposée, a notamment introduit d'importants progrès avec la mise en place de calculs et d'indicateurs supplémentaires.	
Architecture	L'outil est constitué d'un tableau Excel ou LibreOffice. Des feuilles de calcul rassemblent les deux principaux corpus d'hypothèses, portant respectivement sur les données de caractérisation technique du scénario choisi et sur les données de paramétrage du calcul en emplois, une feuille produit ce calcul, et d'autres feuilles fournissent, sous forme de tableau et de graphiques, les différents résultats.	
Rythme d'actualisation	L'outil a fait l'objet d'améliorations successives, et pourra encore évoluer à l'avenir, mais il n'obéit pas à un rythme particulier d'actualisation.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le bâtiment fait partie des secteurs couverts par l'outil, qui s'intéresse plus particulièrement aux actions de construction et de rénovation. Il porte ainsi sur l'ensemble des opérations de construction neuve de logements et de locaux tertiaires, sans distinction à l'intérieur de ces catégories, et des opérations de rénovation, pour lesquelles il distingue maisons individuelles, logements collectifs et tertiaire. En lien avec ces évolutions, l'outil comprend aussi une entrée relative à la construction et à l'extension de réseaux de chaleur.
	Usages	L'outil ne traite pas directement des emplois associés aux usages dans les bâtiments, même si il comporte des lignes relatives aux activités de réparation des équipements et des biens d'une part, d'information et de sensibilisation des consommateurs, actifs ou usagers d'autre part. Il se concentre, pour les bâtiments, sur les actions relatives à la construction et à la rénovation.
	Population	La population ne constitue pas un paramètre d'entrée du modèle. Elle n'est approchée que sous l'angle des emplois générés par la demande dans les secteurs couverts par l'outil.
Périmètre géograph.	Échelle	L'outil procède par un calcul au niveau national, basé sur une comptabilité entrées-sorties établie à cette échelle, mais peut fournir des résultats au niveau des territoires, via l'application de « coefficients de localisation ». Cette application est jugée pertinente à partir de l'échelle d'un EPCI.
	Territoire	La base de l'outil TETE est le tableau entrée-sorties de l'économie française de l'INSEE, qui est établi au périmètre de la France entière. Toutefois, l'outil ne peut pas être utilisé pour les départements et régions d'outre-mer (DROM), dont l'économie n'est pas, ou pas suffisamment couverte par les bases de données publiques utilisées pour le paramétriser.
Périmètre temporel	Horizon	L'outil est paramétré pour réaliser des estimations d'emplois (ex ante) de scénarios de transition écologique, sur la période 2015-2050, et peut être utilisé pour fournir des résultats à toute échéance dans cette gamme, aussi bien à court-moyen terme (2030) qu'à long terme (2050).
	Pas temporel	L'outil est paramétré pour traiter des données au pas annuel, de 2015 à 2050. Mais il produit des calculs distincts pour chaque année, sans mécanisme incrémental, et peut donc être utilisé en fonction des données d'entrée à tout pas de temps multi-annuel, voire pour une seule année d'arrivée.
Principes de calcul	<p>L'outil TETE utilise le tableau entrées-sorties(TES) pour la France, au niveau de désagrégation de 139 branches, pour l'année 2015, préparé par l'INSEE et dans une version qui sépare les consommations intermédiaires importées de celles produites en France.</p> <p>Le modèle couvre un périmètre d'activités jugées les plus pertinentes du point de vue de leur rôle dans la transition énergétique, ou de l'impact que la transition énergétique peut avoir sur elles : la production d'énergies renouvelables et la production nucléaire, le développement des réseaux électriques et systèmes associés, les transports, les activités de réparation des équipements, et l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, dans le neuf et via la rénovation.</p> <p>Le calcul suit les étapes suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • pour chaque activité prise en compte, les indicateurs physiques nécessaires à la description du volume d'activité sont extraits du scénario de transition énergétique considéré pour l'évaluation : il peut s'agir de l'énergie produite par filière, de capacités installées, d'un nombre de km parcourus ou d'un nombre de rénovations thermiques, etc.; • parallèlement, un coût unitaire est calculé pour chaque activité et chaque année considérée. Dans les activités considérées comme matures, les coûts sont supposés stables au cours du temps, dans d'autres les coûts diminuent à mesure qu'elles arrivent à maturité. Ces évolutions sont par ailleurs estimées déduction faite de la hausse du niveau général des prix; 	

- une fois les activités telles que les représente le modèle entrées-sorties caractérisées, le volume d'activité est multiplié par le coût unitaire de façon à calculer une demande monétaire. Celle-ci est ensuite répartie dans une ou plusieurs des 139 branches du TES, selon des coefficients basés sur des expertises technico-économiques;
- parallèlement, pour chacune des 139 branches, on calcule un contenu en emplois, c'est-à-dire un nombre d'emplois créé en France par million d'euros de demande finale;
- dans chaque scénario considéré, pour chaque année considérée, on peut alors calculer un contenu en emplois associés aux transformations en appliquant le contenu en emploi de chaque branche à la demande monétaire qui lui est adressée dans ce scénario pour cette année.

Par cette méthode, l'outil **TETE** permet de prendre en compte non seulement les emplois directs mais aussi toute la chaîne des emplois indirects (fournisseurs, etc.), en se limitant toutefois aux emplois situés en France, puisque le périmètre du TES utilisé distingue les consommations intermédiaires domestiques et importées.

L'outil fournit au final les résultats sous forme de tableaux et de graphiques, pour chacune des 139 branches, et par activité, à différents niveaux d'agrégation.

L'outil peut également être appliqué à un niveau infranational: région, département ou ensemble de communes. Dans ce cas, il s'agit de multiplier pour chaque branche la dépense adressée au niveau national, telle que calculée précédemment, par un coefficient dit de « localisation » (CL) pour obtenir la dépense adressée à la production locale. Le CL peut-être de 100% pour les activités les plus locales, comme l'isolation thermique des bâtiments. Il est plus généralement basé sur le rapport entre le nombre d'emplois dans la branche situés dans le territoire concernés et dans la France entière.

La version 4 a introduit des calculs supplémentaires relatifs à deux dimensions:

- les dépenses globales et les effets induits sur l'emploi. Ces derniers sont définis ici comme l'effet sur l'emploi entraîné par le financement du scénario de transition considéré (un scénario plus coûteux nécessitera un financement plus important, d'où une baisse des dépenses et donc de l'emploi ailleurs dans l'économie);
- la répartition des emplois par type de profession d'autre part. Cette répartition est calculée à partir d'une matrice indiquant, pour chaque secteur de l'économie française, le nombre d'emplois par profession.

Entrées	<p>Le modèle a besoin de deux types d'entrées.</p> <p>Le premier concerne les données relatives au scénario considéré. Il s'agit d'extraire du scénario choisi, parfois en les complétant pour ajuster ces entrées aux besoins de l'outil TETE, les données relatives à l'évolution physique de l'activité des branches d'intérêt.</p> <p>Le second touche à l'ensemble du paramétrage du modèle, c'est-à-dire des coûts unitaires, le calcul du contenu en emplois de chaque branche, et les coefficients d'appel de chaque branche vers les autres branches, ainsi que les coefficients de localisation. Des valeurs par défaut sont incluses dans l'outil.</p>
Sorties	<p>L'outil restitue, sur la base des données d'entrée, un nombre d'emplois désagrégé par branche. Les chiffres estimés ne concernent que les emplois situés en France, la demande générée à l'étranger n'étant pas comptabilisée. Les emplois sont présentés en « équivalent temps-plein » (ETP).</p> <p>L'outil peut être utilisé pour calculer un impact brut sur l'emploi, à une année donnée, ou un impact net, par rapport à l'année de référence. Il peut également permettre de comparer l'impact respectif de scénarios distincts.</p> <p>Depuis la version 4, TETE fournit également des résultats sur la somme des dépenses, le contenu en emploi moyen de la consommation des ménages (comme point de comparaison entre années ou scénarios), et l'effet induit sur l'emploi. On peut enfin déduire l'effet net sur l'emploi, donné comme la somme des effets directs, indirects et induits.</p> <p>Il produit enfin une évaluation de la répartition de l'emploi par profession, établie selon la nomenclature « Professions et catégories socioprofessionnelles 2003 », et disponible avec trois niveaux de détail différents.</p>

Éléments de discussion	
Points forts	<p>L'outil TETE permet de quantifier les emplois, directs et indirects, générés par une partie des activités économiques qui devraient être influencées par la transition écologique, ceci pour la France entière et à un niveau infranational, selon un ou plusieurs scénarios à l'horizon 2050.</p> <p>La conception de l'outil en vue de son utilisation en open source et de son adaptation à différentes échelles se traduisent par la possibilité laissée à l'opérateur de modifier les valeurs prédéfinies par défaut d'un nombre important de paramètres. Ceci inclut:</p> <ul style="list-style-type: none"> • le niveau géographique auquel s'applique le calcul; • les coefficients de localisation; • la croissance annuelle de la productivité du travail. Celle-ci est fixée par défaut à 0,5 % par an, dans la prolongation de la tendance de long terme passée, mais c'est justement une question ouverte de savoir si la transition énergétique est de nature à entraîner une rupture avec cette tendance ou non; • les coûts de chaque activité, inclus leur répartition entre différents postes, et leur évolution dans le temps. Par exemple, l'utilisateur peut modifier le coût de la rénovation thermique, la répartition de ce coût entre les interventions sur l'enveloppe et celle sur le système de chauffage, et l'évolution de ces coûts à l'avenir; • les taux d'importation pour chaque activité, et leur évolution dans le temps. Ces valeurs sont gardées constantes au niveau de 2015 par défaut, ce qui revient à considérer qu'il n'y a ni délocalisation supplémentaire ni relocalisation par rapport à l'année de référence. En modifiant ce paramètre, l'opérateur peut par exemple tester l'impact d'une relocalisation.
Questionnements et développements	<p>Dès sa conception, l'outil TETE a adopté un positionnement intermédiaire parmi les approches d'évaluation des emplois, entre des méthodes se limitant aux emplois directs, plus faciles à mettre en œuvre mais à la portée restreinte, et les approches macroéconomiques, plus complexes et difficiles à interpréter. Grâce à son approche en entrées-sorties, il capte l'ensemble des effets directs mais aussi indirects. En revanche, il n'intègre pas les rétroactions macroéconomiques que les modèles d'équilibre général, par exemple, cherchent à représenter.</p> <p>Seuls des modèles d'équilibre général ou macroéconomiques (tels que Mésange, Némésis, ThreeMe, Imaclim-R) permettent de comparer l'effet à court, moyen et long terme de différentes politiques ou scénarios de transition énergétique sur les grandeurs énergétiques (consommation finale d'énergie, intensité énergétique, émissions de gaz à effet de serre associées) aussi bien que sur l'équilibre</p>

macroéconomique (avec des indicateurs tels que le PIB, le nombre totale d'emplois, les salaires, les prix...). Ces modèles permettent d'évaluer les impacts sur les emplois directs, indirects et induits de différents scénarios de transition écologique.

Tout en atteignant un niveau élevé de désagrégation et en maintenant un niveau de simplicité et de transparence essentiel à son objet, l'outil **TETE** a évolué pour calculer des effets globaux sur les dépenses ou des emplois induits. Ses résultats resteront toutefois différents de ceux de modèles tenant compte des rétroactions macroéconomiques, même si les évaluations suggèrent que, dans le cas d'actions comme le développement de la rénovation thermique, les résultats sont proches.

L'outil péchait par ailleurs par l'absence de vision qualitative : centré sur la quantification des emplois(en ETP), il ne traitait ni de la diversité des métiers dans les branches étudiées, ni de la qualité des emplois(intérêt de l'emploi aux yeux des travailleurs, conditions de travail, précarité...). Les évolutions de la version 4 permettent de mieux prendre en compte ces aspects en quantifiant la distribution par type de profession des emplois mis en jeu.

Ainsi, du point de vue du bâtiment, l'outil **TETE** permet d'évaluer le contenu en emplois, quantitativement et qualitativement, de différentes trajectoires de transition énergétique, en lien avec les choix des scénarios sur le niveau de construction, démolition, réhabilitation des bâtiments, et de l'action de rénovation thermique. Il fournit une information utile sur les opportunités que représentent, à l'échelle nationale et à celle des territoires (s'agissant d'emplois dont le coefficient de localisation est en majorité élevé), et sur les politiques de formation, de qualification ou de reconversion qui peuvent être nécessaire pour répondre aux besoins en emplois, mais ne traite pas la question des conditions macroéconomiques dans lesquels ces emplois doivent être mis en œuvre.

Besoins identifiés	Données	—
	Méthode	—

Positionnement dans la cartographie

	Outils et modèles	L'outil TETE est un modèle de simulation technico-explicite, bottom-up, fondé sur un tableau entrées-sorties(TES) de l'économie française, qu'il croise avec une projection traduite en volumes physiques de trajectoires de transition énergétique pour produire, de l'échelle nationale à celle d'un EPCI, des trajectoires d'emplois associées.
	Champs et paramètres	Le modèle travaille essentiellement dans la dimension économie , approchée sous la forme de branches d'activités très désagrégées, qu'il décrit essentiellement à travers les coûts d'investissement et d'exploitation, avec le volume de coûts par branche comme unité fonctionnelle, et sous forme d'emplois, avec le volume d'emplois par branche comme unité, ces emplois étant eux-mêmes décrits par catégorie (type de profession...). Les autres dimensions ne sont traitées que de façon implicite : c'est notamment le cas de celles des bâtiments, des équipements et des ressources, qui sont touchées par la description concrète des actions de transition relevant des secteurs résidentiel et tertiaire, mais pas modélisées en tant que telles.
	Chaînages et bouclages	Cet outil est conçu pour s'appliquer au calcul en emploi de scénarios de transition, qui ont vocation à être produits par d'autres approches, s'appuyant ou non sur des modèles, à l'échelle nationale ou territoriale. Il est de ce point de vue ouvert, et ne fait l'objet d'aucun chaînage spécifique avec des modèles existants. Il s'appuie au contraire sur sa description explicite et désagrégée des branches d'activités, et de leur lien avec différentes actions relatives à la transition énergétique pour favoriser l'entrée manuelle de données de scénarios produits avec une certaine variété d'outils.
	Questions et enjeux	Par son périmètre, TETE s'ancre évidemment dans le champ des questionnements sur les dynamiques socio-économiques . Il traite ainsi déjà d'enjeux liés aux emplois et compétences, et d'une certaine manière, aux questions de financement et de prix sous l'angle de leur rapport avec un contenu en emplois ou la disponibilité de compétences. Bien qu'il puisse en théorie être relié à d'autres enjeux liés à l'évolution plus profonde de l'économie, y compris dans sa dimension sociétale, ou à la différenciation socio-économique entre territoires par exemple, sa méthode de modélisation est sans doute trop contrainte par l'utilisation du TES pour s'ouvrir à une démarche exploratoire.

A43. Amadeus (RTE)

Outil		
Modèle / outil	Amadeus	<i>Modèle permettant de projeter la consommation d'énergie des secteurs résidentiels et tertiaires, et notamment la courbe de charge électrique associée.</i>
Porteur(s)	RTE	
Développeur(s)	RTE	
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Maximilien PORCHER Chargé d'études au sein du Pôle perspectives du système électrique - RTE François PHILIPPE Chargé d'études au sein du Pôle perspectives du système électrique - RTE	maximilien.porcher@ rte-france.com francois.philippe@ rte-france.com
Prise d'information	Entretien conduit le 30/03/2023 avec Bianka SHOAI-TEHRANI et Gaëlle LESTAGE Compléments apportés par les auteurs le 08/11/2023. Fiche validée le 17/09/2024.	
Ressources	—	
Modèle général		
Finalité	Le modèle Amadeus s'inscrit dans la suite d'outils développés par RTE pour les besoins d'évaluation prospective de la demande et de l'offre électrique, au service notamment des <i>Bilans prévisionnels</i> .	
Type d'outil	Il s'agit d'un outil de simulation exploratoire à visée prévisionnelle ou prospective, fondé sur une agrégation bottom-up et explicite des consommations d'énergie et sur un moteur interne de calcul de courbes de charge.	
Champ de modélisation	Il porte sur l'ensemble de la consommation d'énergie dans les secteurs résidentiels et tertiaires, dans le but d'expliquer la demande électrique et d'en déduire par calcul une courbe de charge.	
Usage type / périodicité	Cet outil est notamment utilisé dans le cadre de la construction des <i>Bilans prévisionnels</i> régulièrement produits par RTE.	
Architecture	Cet outil est en fait constitué de deux modèles distincts, portant respectivement sur le résidentiel et le tertiaire, construits dans Excel sur l'articulation de couches décrivant le stock de bâtiments et son évolution et les différents usages de l'énergie. Ils sont reliés à un outil interne qui traduit la demande annuelle en services énergétiques reposant sur l'électricité en demande horaire, et produit les courbes de charge correspondantes pour 200 années météorologiques.	
Rythme d'actualisation	—	
Périmètre technique	Bâtiments <i>Voir modules spécifiques.</i> Usages <i>Voir modules spécifiques.</i> Population <i>Voir modules spécifiques.</i>	
Périmètre géograph.	Échelle	
	Territoire	
Périmètre temporel	Horizon Le modèle peut être utilisé à différents horizons de temps. Il a été calé jusqu'à 2050 dans le cadre des exercices de <i>Bilan prévisionnel</i> . Pas temporel Il fonctionne au pas annuel pour la construction de la demande énergétique, puis au pas horaire pour le calcul des courbes de charge associées à cette demande.	
Principes de calcul	<i>Voir modules spécifiques</i> pour les calculs relatifs à la consommation annuelle d'électricité dans chacun des deux secteurs. Cette consommation est ensuite traduite en un faisceau probabiliste de courbes de charge en appliquant à la demande de services énergétiques un grand nombre de chroniques de conditions météorologiques pour capter la variabilité induite au niveau de la consommation d'énergie finale pour un service rendu déterminé en termes de confort thermique.	
Entrées	Le modèle a besoin d'hypothèses sur l'évolution démographique, pour laquelle est retenue une projection centrale, et d'éléments relatifs à l'évolution économique, qui constituent le cadrage de différents scénarios. Il s'appuie ensuite sur un calage à son année de référence, soit 2019, du stock de bâtiments et d'équipements avec leur niveau de performance, et se nourrit enfin d'hypothèses sur les différents leviers d'évolution de la consommation (développement des usages, électrification, efficacité, sobriété). Le modèle nécessite en outre, pour le moteur de calcul des courbes de charge, un ensemble statistiquement représentatif de données météorologiques. L'outil s'appuie ainsi sur 200 années météorologiques type fournies par Météo France. Pour les besoins de l'exercice <i>Futurs énergétiques 2050</i> , RTE a pu s'appuyer sur un jeu de données météorologiques prospectives décrivant à la même échelle la variabilité des années météorologiques dans des projections à 2050 correspondant à deux évolutions contrastées du climat : le calcul peut être fait avec quatre bases climatiques différentes : les conditions d'aujourd'hui, celles de 2050 dans les conditions des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du GIEC, et une base interpolée à 2025.	
Sorties	Amadeus fournit pour le secteur résidentiel et pour le secteur tertiaire, par segment et par usage, une courbe de consommation d'électricité décrite au pas annuel. Le moteur de calcul traduit ensuite cette demande en faisceau probabiliste de courbes de charge, intégré aux visions prévisionnelles ou prospectives portant sur l'ensemble du système électrique développées par RTE.	
Détail		
Module spécifique	Amadeus résidentiel	
Périmètre technique	Bâtiments	Le modèle couvre l'ensemble des logements, sur la base d'une description CEREN, en distinguant maisons individuelles et appartements, avec trois catégories d'âge pour chacun de ces types

Usages	Il couvre l'ensemble des usages: chauffage, eau chaude sanitaire (ECS), climatisation, autres usages domestiques(cuisson, éclairage, cuisson, électroménager), ventilation.						
	Le modèle distingue six segments sur le chauffage, et distingue pour l'ECS maisons individuelles et logements collectifs ainsi que le type de production de l'ECS (pour tenir compte des chauffe-eaux thermiques). Il ne fait en revanche pas de distinction entre les types de logement pour la climatisation. La ventilation est prise en compte pour les maisons individuelles, mais la consommation des auxiliaires dans le logement collectif est prise en compte dans le modèle tertiaire.						
Population	Le modèle prend en compte l'ensemble de la population sur son périmètre, décrite à l'échelle nationale en termes de nombre de ménages permettant d'informer des paramètres tels que le taux d'occupation et de cohabitation et les besoins de services énergétiques.						
Périmètre géograph.	<table border="0"> <tr> <td>Échelle</td> <td>Voir modèle général.</td> </tr> <tr> <td>Territoire</td> <td>Voir modèle général.</td> </tr> </table>	Échelle	Voir modèle général.	Territoire	Voir modèle général.		
Échelle	Voir modèle général.						
Territoire	Voir modèle général.						
Périmètre temporel	<table border="0"> <tr> <td>Horizon</td> <td>Voir modèle général.</td> </tr> <tr> <td>Pas temporel</td> <td>Voir modèle général.</td> </tr> </table>	Horizon	Voir modèle général.	Pas temporel	Voir modèle général.		
Horizon	Voir modèle général.						
Pas temporel	Voir modèle général.						
Principes de calcul	<p>Le modèle repose sur le calcul de consommations d'énergie à partir de projections démographiques et d'hypothèses sur l'évolution du parc de bâtiments et sur les usages.</p> <p>La consommation de chauffage est directement rapportée aux unités de logements, sur la base d'une segmentation du parc en fonction de son niveau de performance thermique. Le modèle inclut naturellement des hypothèses de transferts d'usage d'une part, de rénovation thermique des logements d'autre part pour faire varier la demande associée.</p> <p>Pour les autres usages, le calcul est rapporté au nombre de ménages, en tenant compte de la taille moyenne des ménages. L'outil inclut, pour les usages cuisson, électroménager et éclairage, un modèle de parc permettant de prendre en compte, outre les facteurs d'usage, des hypothèses sur les taux d'équipement et sur les taux de renouvellement.</p> <p>Les hypothèses sur certains des leviers sous-jacents sont reliées à un cadrage économique plus général, qui peut déterminer par exemple l'évolution des taux d'équipement ou le rythme de progression de l'efficacité. Ce cadrage est associé aux différents scénarios testés dans le cadre des exercices prospectifs.</p> <p>Le modèle travaille à partir d'une surface moyenne de logement basée sur les données de l'INSEE, établie à 110 m² pour les maisons individuelles et 65 m² pour les logements, et rapporte toutes les consommations des logements à cette unité en tenant compte du nombre de personnes par ménage. Les scénarios démographiques de l'INSEE fournissent des hypothèses sur le nombre de personnes par ménage en prospective, qui sont utilisées dans le modèle pour établir les besoins de construction neuve et les besoins en équipement, avec des hypothèses sur le taux d'équipement par ménage.</p> <p>Les consommations des équipements sont basées sur des calculs de consommation unitaire moyenne, plus ou moins détaillés selon les usages avec des hypothèses pouvant porter par exemple sur le nombre de cycles, le temps d'utilisation, etc.</p> <p>L'outil prend en compte des taux de rénovation, avec des gains en performance. Le nombre total de rénovations est réparti entre les segments et par classe. Il intègre un couplage entre l'impact de la rénovation sur la réduction des besoins en chauffage et des éventuels besoins en climatisation, et prend en compte un effet rebond, en partie lié au gain de confort, détaillé dans le rapport sur le chauffage.</p> <p>L'ensemble des calculs correspondant aux différents scénarios est ensuite traduit en faisceau probabiliste de courbes de charge au pas horaire, sur la base des 200 années météorologiques fournies au moteur de calcul.</p>						
Entrées	Le modèle croise pour ses calculs de nombreuses données d'entrées, combinant des projections statistiques et des paramètres choisis par l'opérateur, relatives d'une part à l'évolution de la population, d'autre part à l'évolution du parc de bâtiments en surface et en performance, et enfin à l'évolution des équipements, de leur efficacité et de leur usage. Il intègre également, pour l'évaluation probabiliste, un jeu de 200 années météorologiques, décrites au pas horaire.						
Sorties	L'outil fournit sur cette base, pour chaque jeu d'hypothèses pris en compte, un calcul de la consommation d'électricité sous forme de courbe de charge au pas horaire. Il fournit pour finir un faisceau probabiliste de consommation horaire sur chaque année couverte par la modélisation.						
Détail							
Module spécifique	Amadeus tertiaire						
Périmètre technique	<table border="0"> <tr> <td>Bâtiments</td> <td>Ce module couvre l'ensemble du secteur tertiaire, intégrant les branches du CEREN et les branches hors bâti.</td> </tr> <tr> <td>Usages</td> <td>Pour les branches du bâti, il traite les usages suivants: le chauffage, la climatisation, l'ECS, le froid, l'éclairage (incluant l'éclairage public), les autres usages spécifiques de l'électricité et la cuisson.</td> </tr> <tr> <td>Population</td> <td>Ce modèle couvre l'ensemble des besoins tertiaires correspondant à la population au périmètre national et de son évolution, mais n'intègre pas de description explicite de cette dimension.</td> </tr> </table>	Bâtiments	Ce module couvre l'ensemble du secteur tertiaire, intégrant les branches du CEREN et les branches hors bâti.	Usages	Pour les branches du bâti, il traite les usages suivants: le chauffage, la climatisation, l'ECS, le froid, l'éclairage (incluant l'éclairage public), les autres usages spécifiques de l'électricité et la cuisson.	Population	Ce modèle couvre l'ensemble des besoins tertiaires correspondant à la population au périmètre national et de son évolution, mais n'intègre pas de description explicite de cette dimension.
Bâtiments	Ce module couvre l'ensemble du secteur tertiaire, intégrant les branches du CEREN et les branches hors bâti.						
Usages	Pour les branches du bâti, il traite les usages suivants: le chauffage, la climatisation, l'ECS, le froid, l'éclairage (incluant l'éclairage public), les autres usages spécifiques de l'électricité et la cuisson.						
Population	Ce modèle couvre l'ensemble des besoins tertiaires correspondant à la population au périmètre national et de son évolution, mais n'intègre pas de description explicite de cette dimension.						
Périmètre géograph.	<table border="0"> <tr> <td>Échelle</td> <td>Voir modèle général.</td> </tr> <tr> <td>Territoire</td> <td>Voir modèle général.</td> </tr> </table>	Échelle	Voir modèle général.	Territoire	Voir modèle général.		
Échelle	Voir modèle général.						
Territoire	Voir modèle général.						
Périmètre temporel	<table border="0"> <tr> <td>Horizon</td> <td>Voir modèle général.</td> </tr> <tr> <td>Pas temporel</td> <td>Voir modèle général.</td> </tr> </table>	Horizon	Voir modèle général.	Pas temporel	Voir modèle général.		
Horizon	Voir modèle général.						
Pas temporel	Voir modèle général.						
Principes de calcul	<p>Le modèle représente le parc tertiaire sous la forme de surfaces de plancher chauffées correspondant aux différentes branches, à l'échelle opérationnelle du réseau RTE. L'évolution des surfaces est déterminée dans chaque branche par des projections sur le nombre d'emplois tertiaires, qui détermine le besoin de surface et donc les besoins de construction neuve des différentes branches. Il est possible de paramétriser l'évolution du ratio de surface par emploi, pour refléter par exemple une part de télétravail ou une rationalisation des surfaces de bureau.</p> <p>Il intègre un modèle de parc pour l'eau chaude sanitaire (ECS) et la climatisation.</p> <p>Pour le parc de chauffage, le calcul repose sur des hypothèses de transfert de combustible, puis pour la part de chauffage électrique celle du transfert du chauffage par effet Joule à la pompe à chaleur (PAC) à partir d'un point initial, qu'il incrémente avec des hypothèses sur le neuf et l'existant. Depuis le Bilan Prévisionnel 2023, le modèle intègre aussi une représentation du parc multi-énergie directement intégrée au module.</p>						

	Pour la rénovation, le paramétrage repose sur un taux de m ² rénovés chaque année, appliqués au parc de chauffage et de climatisation. Pour les autres usages, les consommations évoluent via des trajectoires normatives de consommations unitaires.
Entrées	Le modèle croise des données d'entrées portant sur l'évolution des surfaces corrélative à l'évolution des branches tertiaires, sur l'évolution du parc de bâtiments correspondant, en surface et en performance, et sur celle des équipements et de leur usage. Il intègre également, pour l'évaluation probabiliste, un jeu de 200 années météorologiques, décrites au pas horaire.
Sorties	Comme pour le résidentiel, l'outil fournit sur cette base, pour chaque jeu d'hypothèses pris en compte, un calcul de la consommation d'électricité sous forme de courbe de charge au pas horaire. Il fournit pour finir un faisceau probabiliste de consommation horaire sur chaque année couverte par la modélisation.
Éléments de discussion	
Points forts	L'un des points forts du modèle est la « moulinette » de calcul des courbes de charge, qui au lieu d'une courbe type dans des conditions normalisées calcule 200 courbes de charge représentatives de la variation météorologique.
Questionnements et développements	<p>La sobriété peut être représentée à la fois par plus de cohabitation ou plus de modération dans les usages. Dans le scénario sobriété de <i>Futurs énergétiques 2050</i>, il n'y a toutefois pas eu de changement du paramètre sur le nombre de m² par personne, mais on pourrait l'introduire dans le modèle. On peut noter aussi que le scénario sobriété est établi sur l'hypothèse de fécondité basse de l'INSEE dans la version précédente de ses projections, mais dans ses nouveaux scénarios le niveau central est plus bas que la fécondité basse.</p> <p>La question de la migration inter-régionale de la population a bien été identifiée mais elle n'est pas prise en compte, le modèle travaillant à l'échelle nationale.</p> <p>Le modèle n'entre pas dans le détail de la structure de la population : il considère une évolution nationale et le nombre de personnes par ménage. L'évolution de la population se traduit par le rythme de construction ; il n'y a pas de paramètre adapté pour introduire une variation à ce niveau mais ce serait possible à prendre en compte.</p> <p>Concernant les hypothèses sur le télétravail, qui sont à l'interface entre les deux modules, il n'y a pas de couplage automatique, c'est donc à l'opérateur de rechercher la cohérence dans le paramétrage de chacun des deux. Celle-ci s'opère notamment sur une augmentation de la consommation bureautique dans les logements, et d'un report de la cuisson du collectif vers le domestique. Hors bâtiment, le même type de changement est aussi reporté dans la partie mobilité, sur les trajets domicile-travail.</p> <p>Le modèle ne prend pas explicitement en compte les enjeux de précarité énergétique, dans la mesure où la dimension économique n'y est pas directement traitée. Il permet toutefois, dans son paramétrage, d'orienter en priorité la rénovation vers les segments les plus anciens, ce qui est une manière indirecte de répondre à cet enjeu.</p> <p>Sur le changement climatique, son effet n'est pas directement intégré en énergie, le modèle déterminant en particulier une évolution des besoins de chauffage à conditions normales. Il est introduit dans l'impact de ce besoin normalisé sur le besoin en puissance, via le recours aux différentes bases climatiques.</p> <p>La question des matériaux associés à la construction et à la rénovation n'est pas prise en compte dans les modules bâtiment, mais il y a un modèle entrées-sorties en amont du module <i>Amadeus</i> sur l'industrie, qui inclut les besoins en matériaux. Là aussi, il n'y a pas de passerelle automatique mais le bouclage est possible manuellement.</p> <p>Sur l'artificialisation, le sujet est traité du côté de l'équipe sur l'environnement et n'est pas intégré dans la modélisation côté bâtiment. Sur le résidentiel, il y a une hypothèse basée sur la SNBC de réduction de la part des maisons individuelles qui conduit à moins d'artificialisation. Mais RTE n'a pas scénarisé différents scénarios d'artificialisation.</p> <p>Enfin, sur l'enjeu des crises et discontinuités, le modèle fonctionnant au pas annuel et s'appuyant sur une logique de simulation descriptive, il est possible d'introduire dans le paramétrage des « chocs » à cette échelle. Il ne semble pas possible de le faire à une échelle plus fine.</p>
Besoins identifiés	—
Données	—
Méthode	—

Positionnement dans la cartographie	
	Outils et modèles
	Champs et paramètres
	Chaînages et bouclages
	Questions et enjeux

Ce modèle de RTE est un instrument de simulation orienté énergie, initialement construit dans une visée prévisionnelle et de plus en plus orienté vers une visée prospective. Il est fondé sur une description explicite, relativement désagrégée des consommations d'électricité. Il couvre dans ce cadre, à l'appui d'une vision globale bouclée de l'ensemble de la demande électrique, l'essentiel du parc résidentiel et tertiaire à l'échelle nationale au périmètre desservi par le réseau RTE.

À l'instar des autres modèles traitant cette problématique, *Amadeus* est centré sur les trois dimensions permettant l'explicitation la plus directe de ces consommations : les **bâtiments** qui en sont le support, les **équipements** qui en sont le vecteur, et les **ressources énergétiques** ainsi consommées. Il intègre toutefois par construction des données relatives à la population et à l'économie, sous la forme très générale de projections démographiques et de volumes d'activité.

Les deux modules résidentiel et tertiaire d'*Amadeus* s'inscrivent dans la suite d'outils développés par RTE pour les besoins de plus en plus développés et complexes de ses travaux prévisionnels et prospectifs. Ils sont à ce titre bouclés et chaînés avec d'autres outils traitant d'autres secteurs et n'entrant pas dans le champ de la présente étude, et ces articulations n'ont pas été explorées.

Bien qu'il soit construit pour répondre à des besoins assez spécifiques et opérationnels, le modèle se prête bien, par son approche, à contribuer à l'exploration de nouveaux questionnements. La démarche de RTE évolue d'ailleurs d'exercice en exercice pour s'élargie à de nouveaux sujets, comme l'empreinte au sol du système électrique ou les besoins en matériaux. Ces aspects ne sont pas directement traités dans les modules relatifs à la consommation d'électricité dans les bâtiments résidentiels et tertiaires mais il semble qu'à travers ces développements, *Amadeus* est susceptible de s'ouvrir à des paramètres ou nouvelles hypothèses permettant d'intégrer ces questions. De manière plus directe, le modèle se prête aussi par construction à intégrer davantage, et de façon plus prospective et ouverte des éléments

déjà plus ou moins pris en compte, tels que l'évolution des modes de vie (nouveaux usages, sobriété...) ou l'impact du changement climatique sur la différenciation des trajectoires territoriales.

A44. Outil PTEF (The Shift Project)

Outil		
Modèle / outil	Outil PTEF	
Porteur(s)	The Shift Project	
Développeur(s)	The Shift Project	
<i>Modèle de projection des consommations d'énergie et de matériaux du secteur résidentiel, associé à des modèles sur certaines branches tertiaires (santé, culture...) utilisé dans le cadre d'une démarche globale (le Plan de transformation de l'économie française) visant à documenter l'atteinte de la neutralité carbone en 2050.</i>		
Interlocuteur(s) et ressources		
Contact(s)	Rémi BABUT Chef de projet Logement-PTEF-Rénovation – The Shift Project	remi.babut@theshiftproject.org
Prise d'information	Entretien conduit le 02/03/2023. Fiche validée le 28/09/2024.	
Ressources	Informations générales sur le plan : https://ilnousfautunplan.fr Logement : https://theshiftproject.org/article/rapport-final-habiter-dans-une-societe-bas-carbone-7-octobre-2021/	
Modèle général		
Finalité	La modélisation appliquée au bâtiment s'inscrit dans une démarche plus générale, rassemblée sous le chapeau du Plan de transformation de l'économie française (PTEF). Celui-ci vise explicitement à convaincre les décideurs politiques et économiques de planifier la transition, en s'appuyant sur des propositions concrètes et chiffrées. Le PTEF dans son ensemble vise ainsi la neutralité carbone, au périmètre et à l'échéance de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC). La question économique, et notamment celle de l'emploi est au cœur du dispositif, et les acteurs du monde économique sont consultés et impliqués dans la démarche.	
Type d'outil	Le PTEF ne constitue pas un outil à proprement parler, ni même une suite d'outils. Il s'agit plutôt d'une démarche hybride, combinant des outils de simulation plus ou moins explicites au niveau sectoriel, et des approches plus transversales, l'ensemble étant structuré par une entrée par secteur de consommation ou d'activité. La démarche combine des approches dites par secteurs « usages » (mobilité, logement, numérique...), secteurs « serviciels » (santé, culture, administration, enseignement...), secteurs « amont » (production agricole, industrielle...), le tout étant complété par des chantiers transversaux sur l'emploi, la finance, etc. Ainsi, s'agissant du bâtiment, le parc résidentiel est abordé par une entrée « logement » (voir ci-dessous), tandis que le parc tertiaire est au contraire abordé via des secteurs comme la culture ou la santé. En complément, un chantier transversal traite du sujet sous l'angle « villes et territoires ».	
Champ de modélisation	La démarche couvre dans son ambition l'ensemble de l'économie française, même si elle ne permet pas d'en traiter de façon homogène tous les aspects. Concernant le bâtiment, le secteur résidentiel est traité par le biais d'une entrée sectorielle dédiée, tandis que le tertiaire, et plus largement le reste du parc bâti le sont par des entrées plus spécifiques.	
Usage type / périodicité	La démarche de modélisation sous-jacente au PTEF est spécifiquement dédiée à son élaboration. Elle n'a pas vocation à être dupliquée ou renouvelée dans le temps, même si cela n'est pas non plus exclu ; les outils développés à l'appui de la démarche peuvent par ailleurs faire l'objet, au cas par cas, d'un processus d'amélioration plus ou moins continu et d'une application à d'autres analyses.	
Architecture	Le plan résulte de l'articulation de différents modèles et études sectorielles. 15 « secteurs », au sens divers évoqué ci-dessus, sont étudiés : énergie, emploi, industrie lourde, industrie automobile, logement, agriculture, mobilité quotidienne, mobilité longue distance, fret, santé, culture, administration publique, usages numériques, villes & territoires et finance. D'autres éléments peuvent venir enrichir la vision globale. L'architecture qui en résulte est complexe, et l'hétérogénéité des clés d'entrée comme des approches de modélisation correspondantes ne permet pas de « remonter » le tout dans une forme de modélisation intégrée. C'est notamment pour assurer la cohérence de l'ensemble que des entrées transversales sont développées. C'est en particulier le cas des éléments consacrés au bouclage en énergie d'une part, et au bouclage matières d'autre part, ainsi qu'à l'approche transversale de l'impact de la décarbonation sur l'emploi.	
Rythme d'actualisation	Il s'agit en tout état de cause du premier exercice de ce type. Après la publication de la vision d'ensemble, les rapports sectoriels sont publiés progressivement. D'autres peuvent être développés au fil de l'eau.	
Périmètre technique	Bâtiments	Le PTEF a vocation à couvrir l'ensemble de l'économie française, donc des bâtiments. Toutefois, si l'entrée « logements » permet de traiter le parc résidentiel dans son ensemble (voir ci-dessous), le choix d'une entrée par type d'activité comme l'administration ou la santé ne permet pas de couvrir de façon similaire l'ensemble du secteur tertiaire.
	Usages	D'une manière générale, l'ensemble des usages relatifs aux bâtiments est couvert, avec la même réserve sur le caractère plus ou moins complet et hétérogène de ce traitement du fait de l'approche hybride de la modélisation.
	Population	De même, l'ensemble de la population est pris en compte dans ses multiples dimensions : ménages occupant des logements, personnes actives contribuant à la production (emploi), consommateurs de bien ou de loisirs, usagers des services publics...
Périmètre géograph.	Échelle	Le PTEF est développé à l'échelle nationale. Des déclinaisons territoriales peuvent être élaborées, mais elles font l'objet d'une démarche spécifique.
	Territoire	La démarche couvre la France métropolitaine.
Périmètre temporel	Horizon	L'horizon de la projection développée dans le PTEF est 2050, conformément à celui de la SNBC.
	Pas temporel	La projection est de manière générale construite de façon incrémentale avec un pas de temps annuel.
Principes de calcul	<i>Voir l'application au résidentiel.</i>	
Entrées	<i>Voir l'application au résidentiel.</i>	

Sorties		Voir l'application au résidentiel.
Détail		
	Module spécifique	Module sectoriel résidentiel
Périmètre technique	Bâtiments	La modélisation couvre l'ensemble du parc résidentiel, hors logements vacants (dont le volume est toutefois analysé en lien avec un facteur d'occupation) et les résidences secondaires.
	Usages	Le modèle couvre l'ensemble des usages énergétiques, toutes énergies confondues, avec des approches de calcul différentes selon les usages.
	Population	L'ensemble de la population est pris en compte, au périmètre des ménages occupant des résidences principales.
Périmètre géograph.	Échelle	Voir le modèle général, l'approche est nationale, des déclinaisons régionales sont possibles parallèlement au national.
	Territoire	Voir le modèle général.
Périmètre temporel	Horizon	Voir le modèle général.
	Pas temporel	Voir le modèle général.
Principes de calcul	<p>L'outil modélise le parc résidentiel et l'évolution de ses consommations énergétiques en intégrant la construction et la rénovation.</p> <p>Le parc résidentiel actuel est décrit selon une typologie distinguant maisons individuelles et logement collectif, et les répartissant par classe de performance et par énergie de chauffage. La performance est basée sur l'échelle du DPE, et établie à partir de l'étude ANAH de 2008, avec un calcul DPE selon une typologie de bâti, prolongée de 2008 à 2020.</p> <p>Un modèle de stock est ensuite appliqué, qui intègre les démolitions, la construction neuve, et les rénovations de l'enveloppe et des systèmes, qui génère des sauts de classe énergétique et des changements d'énergie.</p> <p>La consommation énergétique du parc est alors réagrégée par vecteur énergétique.</p> <p>Plus spécifiquement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la consommation de chauffage est modélisée avec un modèle basé sur les classes du DPE, - la consommation d'eau chaude sanitaire (ECS) évolue sur la base d'un ratio issu de l'étude ECspec, - la consommation d'électricité spécifique est basée sur la modélisation de RTE, - la cuisson est systématiquement électrifiée, <p>La climatisation est négligée à ce stade.</p>	
Entrées	<p>Le rythme de construction neuve est basé sur le nombre de nouveaux ménages selon l'hypothèse centrale de l'INSEE, en conservant un "offset" correspondant entre l'écart actuel entre le nombre de logements construits et le nombre de nouveaux ménages.</p> <p>Le rythme de démolition est la poursuite du tendanciel, qui est réparti dans les classes énergétiques avec une part plus forte affectée aux classes les plus mauvaises.</p> <p>La rénovation est modélisée par une matrice de changements d'énergies, et un jeu d'hypothèses sur les classes bénéficiant de la rénovation et la répartition de leur classe d'arrivée.</p> <p>L'unité fonctionnelle est le logement.</p> <p>Une hypothèse de stabilisation des surfaces par logement neuf est prise en compte. En revanche, comme le modèle utilise l'hypothèse INSEE du nombre de ménage, il n'y a pas d'hypothèse de sobriété sur le taux de cohabitation des ménages dans la première version du modèle.</p>	
Sorties	<p>L'outil permet de modéliser les consommations énergétiques du parc résidentiel.</p> <p>Les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont calculées pour la consommation d'énergie, donc au scope 1 et 2. Un ratio appliquée à la construction neuve et à la rénovation permet d'estimer les GES liés aux matériaux (scope 3).</p> <p>La consommation de matériaux pour le résidentiel est estimée à partir de ratios tirés du modèle du scénario ADEME (documentation technique de MODEIRE). Cette sortie alimente les modèles logistique et industrie du PTEF. De façon générale, le PTEF réalise un bouclage en énergie et en matériaux pour s'assurer que la transition proposée est réaliste du point de vue de ces limites physiques.</p> <p>Le modèle fournit également une estimation en emploi. De façon générale, l'emploi est un enjeu central du PTEF : les modèles sectoriels estiment le besoin en emploi et en conversions. Il ne s'agit pas d'une contrainte de rebouclage, mais plutôt un message politique de la création d'emploi et du besoin de conversions.</p>	
Éléments de discussion		
Points forts	<p>La démarche appliquée au secteur du logement s'inscrit bien sûr dans le cadre du PTEF dans une approche plus globale de planification à l'échelle de l'économie française, visant à en assurer la cohérence avec une transformation générale comme avec l'ambition de décarbonation. Plus spécifiquement, elle présente une cartographie du parc et de son évolution claire, dont l'adossement à l'échelle du DPE garantit la lisibilité des résultats.</p>	
Questionnements et développements	<p>Plusieurs aspects de la modélisation restent à améliorer.</p> <p>C'est notamment un besoin identifié sur les actions de sobriété d'une part, et sur la climatisation d'autre part. Pour cette dernière, un ajout est prévu sur la base d'une analyse réalisée par des étudiants de l'ENPC, qui applique la méthode de mesure du besoin de rafraîchissement par les degrés-jours froid(DJF) à différents scénarios du GIEC.</p> <p>Un autre développement envisagé autour de cet enjeu d'adaptation au climat porte sur la réalisation de stress tests selon différents scénarios du GIEC de dérèglement du climat.</p> <p>Par ailleurs, les hypothèses de rénovation vont être revues pour adopter une courbe en « S » qui soit plus réaliste en emploi en début de période.</p> <p>Enfin, des travaux sont prévus pour analyser la financiarisation du logement, et prendre en compte de risque de défaut des emprunteurs.</p>	
Besoins identifiés	Données	<p>Le point de départ de description du parc est une étude ANAH 2008. L'étude du SDÉS ne partage pas des résultats suffisamment précis pour être exploitables (par exemple pas de croisement entre étiquette DPE et systèmes de chauffage). Le Shift Project est évidemment intéressé par le développement de la BNDB et celui d'une base DPE redressée.</p> <p>L'idéal serait qu'un acteur agrège les différentes sources et mette à disposition une description détaillée du parc dans son ensemble.</p>

Méthode	<p>Les besoins qui apparaissent portent davantage sur des études qui permettraient de préciser certains aspects que de méthode à proprement parler.</p> <p>L'un des domaines où davantage de résultats d'études seraient utiles concerne la climatisation et les PAC, pour mieux caractériser différents paramètres: taux d'équipement des logements, usage et consigne, amélioration des performances (COP), place des PAC hybrides et leur part d'usage gaz, etc. Le Shift Project exprime également son intérêt pour une étude sur le solaire thermique, éclairant la place du solaire combiné, son intérêt technique, l'attractivité de cette filière qui semble très liée aux subventions, etc.</p> <p>Enfin, dans le même registre, il serait intéressant de disposer d'une étude sur les effets de la RE2020 sur les besoins en matériaux de construction.</p> <p>Par ailleurs, sur l'approche territoriale du besoin en logement, le Shift Project développe sa propre analyse, appuyé sur des travaux qu'il a suscités et pilotés par des étudiants de l'ENPC sur la modélisation du besoin en logement utilisant le maillage territorial d'OTELO et le réagrégeant en bottom-up au niveau national.</p>
Positionnement dans la cartographie	
 Outils et modèles	Modèle portant sur le parc de résidences principales, à l'échelle de la France métropolitaine et projetant les consommations d'énergie et de matériaux à 2050 dans une logique normative (atteinte de la cible SNBC) et bottom-up.
 Champs et paramètres	L'unité fonctionnelle du module résidentiel est le logement. Les sorties principales sont la consommation d'énergie et de matériaux.
 Chaînages et bouclages	Les calculs sur le secteur résidentiel et les branches tertiaires concernées ont été intégrées dans les travaux plus larges autour du PTEF. Il ne s'agit pas à proprement parler de chaînage ou de bouclage explicite, mais d'une attention générale portée à la cohérence entre modélisations sectorielles via des bouclages énergie et matières transversaux.
 Questions et enjeux	L'inscription de cette modélisation dans le PTEF permet d'éclairer des enjeux comme ceux de l'emploi ou des moyens de production énergétique.

A45. Elioth (The Shift Project)

Outil								
Modèle / outil	Modèle de parc résidentiel, Elioth	Outil de modélisation des trajectoires de décarbonation du parc de bailleurs sociaux.						
Porteur(s)	Groupement Elioth							
Développeur(s)	Groupement Elioth							
Interlocuteur(s) et ressources								
Contact(s)	Rémi BABUT Directeur de projets au pôle Trajectoires	r.babut@elioth.fr						
Prise d'information	Entretien conduit le 02/03/2023. Fiche validée le 27/09/2024.							
Ressources	https://elioth.com//trajectoires/ Exemple d'action de conseil : http://leconseilbyegis.fr/strategie-bas-carbone-et-energie-bailleur-social-3f/							
Modèle général								
Finalité	L'objectif de l'approche « trajectoires » développée par Elioth est de fournir un conseil en stratégie de parc bâti en vue d'objectifs de décarbonation, à destination d'acteurs de l'immobilier et de la construction (bailleurs sociaux, foncières, promoteurs...).							
Type d'outil	Elioth désigne un bureau d'étude engagé dans une démarche de réflexion et d'innovation autour de sujets bâtiment, les actions de conseil qui en découlent, et un outillage plus spécifiquement dédié à la projection de trajectoires. Sous cet angle, la démarche proposée repose sur une modélisation de trajectoire à l'échelle du parc par simulation d'actions de décarbonation.							
Champ de modélisation	L'outil développé à cet effet projette l'évolution des consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre associées d'un parc de bâtiments.							
Usage type / périodicité	L'outil développé dans ce cadre est susceptible d'accompagner différents acteurs dans des contextes différents mais similaires, sans cadre prédéterminé ni périodicité. Elioth a par exemple accompagné, avec le Conseil by Egis le bailleur social 3F dans l'élaboration d'un Plan de transition à 2050.							
Architecture	Un outil a été développé sur Excel pour projeter l'évolution du parc du bailleur. L'état initial du parc est établi à partir des données de DPE et de systèmes énergétiques collectées par le bailleur. Une trajectoire d'évolution au fil de l'eau est construite à partir des données d'activité du bailleurs (démolitions, constructions, rénovations...). Afin de construire des scénarios alternatifs d'évolution, différents rythmes et bouquets d'action de performance énergétique (changements de systèmes énergétiques, isolation, exigences extra-réglementaires sur les constructions neuves, accompagnement à la sobriété des locataires...) peuvent ensuite être appliqués à ce parc. Des trajectoires sont construites pour chaque filiale avant d'être agrégées à l'échelle du groupe.							
Rythme d'actualisation	L'outil ne fait pas l'objet d'un programme d'actualisation dédié, mais est susceptible d'évoluer et d'être amélioré au fil de différentes utilisations. De facto, il subit de légères modifications pour s'adapter au mode de travail de chaque bailleur accompagné.							
Périmètre technique	<table border="0"> <tr> <td>Bâtiments</td><td>Le périmètre est celui du parc bâti résidentiel porté par les gestionnaires de parc auquel l'outil s'adresse, au premier rang desquels les bailleurs sociaux.</td></tr> <tr> <td>Usages</td><td>La modélisation couvre l'ensemble des usages énergétiques liés à l'occupation des bâtiments.</td></tr> <tr> <td>Population</td><td>L'outil porte sur les surfaces et leur usage, intégrant donc la population sous la forme d'occupants et d'usagers des logements couverts, mais sans la modéliser en tant que telle.</td></tr> </table>	Bâtiments	Le périmètre est celui du parc bâti résidentiel porté par les gestionnaires de parc auquel l'outil s'adresse, au premier rang desquels les bailleurs sociaux.	Usages	La modélisation couvre l'ensemble des usages énergétiques liés à l'occupation des bâtiments.	Population	L'outil porte sur les surfaces et leur usage, intégrant donc la population sous la forme d'occupants et d'usagers des logements couverts, mais sans la modéliser en tant que telle.	
Bâtiments	Le périmètre est celui du parc bâti résidentiel porté par les gestionnaires de parc auquel l'outil s'adresse, au premier rang desquels les bailleurs sociaux.							
Usages	La modélisation couvre l'ensemble des usages énergétiques liés à l'occupation des bâtiments.							
Population	L'outil porte sur les surfaces et leur usage, intégrant donc la population sous la forme d'occupants et d'usagers des logements couverts, mais sans la modéliser en tant que telle.							
Périmètre géograph.	<table border="0"> <tr> <td>Échelle</td><td>L'échelle de modélisation est celle du parc de logements géré par un acteur tel qu'un bailleur social.</td></tr> <tr> <td>Territoire</td><td>L'outil peut s'appliquer partout en France métropolitaine mais ne porte pas d'entrée territoriale en tant que telle.</td></tr> </table>	Échelle	L'échelle de modélisation est celle du parc de logements géré par un acteur tel qu'un bailleur social.	Territoire	L'outil peut s'appliquer partout en France métropolitaine mais ne porte pas d'entrée territoriale en tant que telle.			
Échelle	L'échelle de modélisation est celle du parc de logements géré par un acteur tel qu'un bailleur social.							
Territoire	L'outil peut s'appliquer partout en France métropolitaine mais ne porte pas d'entrée territoriale en tant que telle.							
Périmètre temporel	<table border="0"> <tr> <td>Horizon</td><td>L'horizon de travail est généralement 2050, mais la méthode de simulation incrémentale permet de projeter des résultats à différentes échéances, en fonction de chaque cadre d'application. En particulier, les projections sont parfois prolongées dans le temps pour évaluer les gains énergétiques des actions effectuées les années les plus proches du terme de la modélisation.</td></tr> <tr> <td>Pas temporel</td><td>Le pas de calcul incrémental est un pas annuel. Les hypothèses sur les choix du bailleurs (volume de construction, de rénovation...) sont généralement prises en cohérence avec les bailleurs à une échelle décennale.</td></tr> </table>	Horizon	L'horizon de travail est généralement 2050, mais la méthode de simulation incrémentale permet de projeter des résultats à différentes échéances, en fonction de chaque cadre d'application. En particulier, les projections sont parfois prolongées dans le temps pour évaluer les gains énergétiques des actions effectuées les années les plus proches du terme de la modélisation.	Pas temporel	Le pas de calcul incrémental est un pas annuel. Les hypothèses sur les choix du bailleurs (volume de construction, de rénovation...) sont généralement prises en cohérence avec les bailleurs à une échelle décennale.			
Horizon	L'horizon de travail est généralement 2050, mais la méthode de simulation incrémentale permet de projeter des résultats à différentes échéances, en fonction de chaque cadre d'application. En particulier, les projections sont parfois prolongées dans le temps pour évaluer les gains énergétiques des actions effectuées les années les plus proches du terme de la modélisation.							
Pas temporel	Le pas de calcul incrémental est un pas annuel. Les hypothèses sur les choix du bailleurs (volume de construction, de rénovation...) sont généralement prises en cohérence avec les bailleurs à une échelle décennale.							
Principes de calcul	Pour apporter un conseil auprès de bailleurs sur la trajectoire de décarbonation à l'échelle de leur parc, l'outil s'appuie sur un calcul dont les hypothèses sont co-construites par l'expertise du modélisateur et les opérationnels du bailleur. Les orientations envisagées sous forme d'actions basées sur une analyse concrète du parc alimente ensuite des documents stratégiques (plan d'action, stratégie de financement...). Il s'agit notamment d'estimer les volumes financiers nécessaires pour une trajectoire donnée ou le volume d'opérations de construction et de rénovation à traiter par les opérationnels. L'outil intègre la construction neuve et la rénovation de l'enveloppe et des systèmes, et modélise, avec des hypothèses fondées sur la caractérisation de la performance des logements (sur la base du DPE) et de leur occupation, l'ensemble des consommations d'énergie associées et les émissions de gaz à effet de serre ainsi générées. Sur la base de la caractérisation concrète du parc concerné, l'outil fournit un calcul désagrégé des gisements à disposition. Ainsi, la démarche fournit une modélisation de trajectoire dite « 1,5°C », ou de neutralité carbone, avec la définition des objectifs et indicateurs clefs pour l'atteinte de cette trajectoire, permettant à l'échelle du bailleur l'élaboration de sa stratégie de contribution ou le cas échéant de compensation carbone. L'outil fournit un bilan prospectif intégrant l'ensemble des leviers considérés, similaires à ceux que prend en compte l'outil national.							
Entrées	Les entrées sont le nombre de logements démolis, construits et rénovés. Différentes exigences de performance énergétique et carbone sont applicables à la construction (recours à un vecteur énergétique bas carbone, Ic_construction satisfaisant à des exigences RE n+3...) et la rénovation (atteinte d'un niveau BBC, passage à un vecteur bas carbone...). Ces hypothèses sont différenciées selon							

	<p>différents segments par exemple sur les modes de productions, les leviers des bailleurs n'étant pas les mêmes en MOA directe, en VEFA ou en acquisition-amélioration par exemple.</p> <p>L'unité fonctionnelle est le logement, avec des entrées permettant de faire évoluer le nombre de logements en fonction du rythme de construction et de démolition, leur performance énergétique en fonction d'actions de rénovation thermique, leur système de chauffage en lien avec ces évolutions ou de manière distincte, et les consommations relatives aux différents usages.</p> <p>Le modèle utilise également des coûts associés aux différents paramètres, qu'il s'agisse de coûts de rénovation ou de changement d'équipement comme de coûts d'usage.</p>
Sorties	<p>L'outil permet de modéliser les consommations énergétiques du parc résidentiel couvert, et les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées, couvrant donc les scopes 1 et 2. Des ratios appliqués à la construction neuve et à la rénovation permet d'estimer les GES liés aux matériaux (scope 3).</p> <p>Il fournit également, à l'appui des trajectoires de décarbonation qu'il permet de construire, une estimation des volumes financiers et de leur chronique.</p>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME, 2016, Approche intégrée et multicritères de la modélisation territoriale – Éléments de cadrage pour la gestion des données territoriales.
- ADEME (2019), Prospectives 2035 et 2050 de consommation de matériaux pour la construction neuve et la-rénovation énergétique
- ADEME, 2021, Transition(s) 2050, Agir Maintenant, Choisir pour le Climat, <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/les-scenarios/>
- ADEME, 2022, Modèle ANTONIO (trANSiTION ecologique des logements), Notice technique, <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5749-modele-antonio-transition-ecologique-des-logements.html>
- ADEME, CSTB, 2021, Imaginons Ensemble les Bâtiments de Demain, <https://batimentdemain.fr/rapport-final/>
- Association négaWatt, 2020, Analyse et concaténation du volet énergie des SRADDET, https://www.negawatt.org/IMG/pdf/201103_rapport_analyse-et-concatenation-du-volet-energie-des-sraddet.pdf
- Association négaWatt, 2022, Scénario négaWatt 2022, https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022*
- CIRED, 2024, RES-IRF Technical documentation on Github, <https://cired.github.io/Res-IRF/index.html>
- CGDD, 2019, Trajectoires vers l'objectif « zéro artificialisation nette », Eléments de méthode, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Trajectoires%20vers%20l%E2%80%99objectif%20z%C3%A9ro%20artificialisation%20nette.pdf>
- CGDD, 2022, TiTAN, Renforcer l'analyse économique pour réussir la transition climatique, https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/TiTAN_03_02_2022.pdf
- École nationale supérieure des mines, 2024, Building model technical documentation, <https://gitlab.com/energytransition/buildingmodel>
- Gaspard, A., Chateau, L., Laruelle, C., Lafitte, B., Léonardon, P., Minier, Q., Motamedi, K., Ougier, L., Pineau, A., Thiriot, S., 2023, "Introducing sufficiency in the building sector in net-zero scenarios for France", Energy and Buildings, Volume 278, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112590>
- Giraudet, L.-G., Guivarch, C., Quirion, P. (2012), « Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modelling », *Energy Economics*, 34(2), 426-445.
- Huu Tam Nguyen, A.. Modélisation du parc de bâtiments du secteur tertiaire et simulation énergétique. Energie électrique. Université Paris sciences et lettres, 2021. Français. NNT : 2021UP- SLIM005 . tel-03228301. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03228301>
- INSEE, 2018, Des projections nationales aux projections locales, Collection « Documents de travail », No H2021-01, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5055862>
- INSEE, 2024, Omphale technical documentation, <https://github.com/InseeFr/Omphale>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926
- Le Treut, G. Description of the IMACLIM-Country model: A country-scale computable general equilibrium model to assess macroeconomic impacts of climate policies. CIRED working paper n° 2020-85, 2020. <https://hal.science/hal-02949396/document>
- Mastrucci, A., Niamir, L., Boza-Kiss, B., Bento, N., Wiedenhofer, D., Streeck, J., Pachauri, S., Wilson, C., Chatterjee, S., Creutzig, F., Dukkipati, S., Feng, W., Grubler, A., Jupesta, J., Kumar, P., Marangoni, G., Saheb, Y., Shimoda, Y., Shoai-Tehrani, B., Yamaguchi, Y., van Ruijven, B., 2023, "Modelling Low Energy Demand Futures for Buildings: Current State and Research Needs", Annual Review of Environment and Resources, 48:761-92, doi: 10.1146/annurev-environ-112321-102921

Mathy, S., Fink, M., Bibas, R. Repenser le rôle des scénarios : construction participative de scénarios bas carbone pour la France, *Revue d'économie industrielle*, 148 | 4e trimestre 201424. <http://journals.openedition.org/rei/5934>

Nauleau, M-L., 2015, L'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel français : analyse des déterminants d'investissement et des politiques publiques, Thèse de doctorat en Sciences économiques, École des hautes études en sciences sociales, Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (laboratoire), Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France)

Thao Khamsing, W., Ceci-Renaud, N., Guillot, L. 2016. Simuler l'impact social de la fiscalité énergétique : le modèle Prometheus (PROgramme de Microsimulation des Énergies du Transport et de l'Habitat pour ÉvalUations Sociales) - Usages et méthodologie. CGDD, Collection Études et documents, n°138. <https://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0083/Temis-0083851/22397.pdf>

The Shift Project (2019), Comprendre les enjeux de la modélisation du lien complexe entre énergie, climat et économie. État des lieux et limites de la modélisation énergie-climat au niveau mondial. <https://theshiftproject.org/article/comprendre-modelisation-energie-climat-economie-scenarios/>

Rauzier, E., Verzat, B., Letz, T., Metivier, S., Moteau, S., Rieser, T., Julien, C., ADEME, Institut NégaWatt, ENERTECH, SOLAGRO, 2020, Transition industrielle – Prospective énergie matière : vers un outil de modélisation des niveaux de production, <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/340-transition-industrielle-prospective-energie-matiere-vers-un-outil-de-modelisation-des-niveaux-de-production.html>

Rogreau, A., 2020, Vers une approche intégrée d'aide à la planification énergétique territoriale : application à la rénovation énergétique des bâtiments, Thèse de doctorat en Energétique et génie des procédés, Université Paris sciences et lettres, Centre Procédés, Énergies Renouvelables et Systèmes Énergétiques, École nationale supérieure des mines, <https://pastel.hal.science/tel-02969503>

Sorin, E., Tirado, R., Gully, E., Louërat, M., Laurenceau, S., BTPFlux: a building material flow analysis model to enhance the urban metabolism on French territories, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. DOI 10.1088/1755-1315/1078/1/012027

Vivier, L., Giraudeau, L-G., 2022, A retrofitting obligation for French dwellings – A modelling assessment, eceee summer study 2022 proceedings

Waisman, et al. 2012. 'The Imaclim-R Model : Infrastructures, Technical Inertia and the Costs of Low Carbon Futures under Imperfect Foresight. *Climatic Change*, Volume 114, Number 1, 101-120

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 – Liste des entretiens et de la rédaction par les auteurs de fiches, et répertoire des outils ou modèles couverts par la démarche, par ordre chronologique d'intégration	21
Tableau 2 – Correspondances principales et secondaires identifiées au croisement des facteurs prospectifs avec les thèmes de la cartographie « Questions et enjeux ».....	77
Tableau 3 – Principales correspondances identifiées au croisement des facteurs prospectifs avec les dimensions de la cartographie « Champs et paramètres »	83

FIGURES

Figure 1 – Notion « d'écosystème » de la production prospective du secteur du bâtiment et de l'immobilier	11
Figure 2 – 22 facteurs prospectifs de la démarche « Imaginons ensemble les bâtiments de demain	13
Figure 3 – Schéma de principe du rôle des outils de modélisation pour construire les trajectoires de transition du secteur du bâtiment et de l'immobilier.....	18
Figure 4 – Démarche exploratoire de repérage et d'analyse des outils et modèles.....	20
Figure 5 – Schéma de principe de la démarche de cartographie	23
Figure 6 – Base de la cartographie « Questions et enjeux » des principaux questionnements prospectifs en suspens ou émergents à prendre en compte par les outils et les modèles.....	30
Figure 7 – Trame de la cartographie « Champs et paramètres » des principales dimensions couvertes dans leur démarche descriptive par les outils et modèles analysés.....	35
Figure 8 – Principales traditions de modélisation du secteur du bâtiment.....	36
Figure 9 – Trame de la cartographie « Outils et modèles » des principales entrées, des principaux modes de calcul et des principaux impacts modélisés par les outils et modèles analysés.....	37
Figure 10 – Cartographie des chaînages et bouclages d'outils réalisés par l'ADEME pour l'exercice Transition(s) 2050.....	39
Figure 11 – Nombre de modèles analysés s'attachant directement aux différents facteurs prospectifs, par ordre de représentation dans les outils et modèles analysés.....	78
Figure 12 – Nombre de modèles analysés s'attachant directement aux différentes catégories constituant la trame des enjeux et questions prospectifs, par catégorie.....	79
Figure 13 – Nombre de modèles analysés s'attachant directement aux différents enjeux et questions prospectifs.....	79
Figure 14 – Cartographie des unités fonctionnelles et des leviers mis en jeu dans les différentes dimensions de la modélisation par les outils et modèles analysés.....	84
Figure 15 – Cartographie des principales entrées, des principaux modes de calcul et des principaux impacts modélisés par les outils et modèles analysés	90
Figure 16 – Identification de chaînages et bouclages potentiellement manquants dans la cartographie des chaînages et bouclages d'outils réalisés par l'ADEME pour l'exercice Transition(s) 2050	95

SIGLES ET ACRONYMES

3D	trois dimensions
ACV	analyse en cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFMD	Analyse de flux matières dynamique
AME et AMS	scénarios dits Avec mesures existantes et Avec mesures supplémentaires
Anah	Agence nationale de l'habitat
ANTONIO	modèle Transition écologique des logements
AREP	Architecture recherche engagement post-carbone
AtAC	Atlas de l'auto-consommation collective
BBC	bâtiment basse consommation
BDD	base de données
BDNB	Base de données nationale des bâtiment
BD TOPO	Base de données topographiques
BTP	bâtiments et travaux publics
BURGEAP	Bureau d'études en géologie appliquée
Capex	capital expenditures (dépenses d'investissement)
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CASCL	petit commerce, artisanat, services publics de santé, culture et loisir
CatNat	Inventaire des catastrophes naturelles
CCNUCC	Convention cadre des Nations-Unies sur le changement climatique
CEE	Certificats d'économie d'énergie
CEREN	Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie
CGDD	Commissariat général au développement durable
CHEB	commerces de grande distribution, hôtels, enseignement, bureaux
CIRED	Centre international de recherche sur l'environnement et le développement
CITEPA	Centre interprofessionnel technique d'études la pollution atmosphérique
CIVE	culture intermédiaire à vocation énergétique
CLEVER	Collaborative Low Energy Vision for the European Region
CNRM	Centre national de recherches météorologiques
COICOP	Classification of Individual Consumption by Purpose (classification des fonctions de consommation des ménages)
COMETH	Core for Modelling Energy and Thermal Comfort
CONSOMAT	Modèle Construction et matériaux
COP	coefficient de performance
CPSR	Commission prospective systèmes et réseau
CSR	combustible solide de récupération
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
DDP	Deep Decarbonisation Pathways
DDT	Direction départementale des territoires
DGAC	Direction générale de l'aviation civile
DGALN	Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat

DGFiP	Direction générale des finances publiques
DG Trésor	Direction générale du trésor
DGITM	Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités
DHUP	Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages
DLE	données locales de l'énergie
DNSH	principe Do No Significant Harm
DNTE	Débat national sur la transition énergétique
DPE	Diagnostic de performance énergétique
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
DREETS	Direction régionale de l'économie, de l'emploi, du travail et des solidarités
DROM	départements et régions d'outre-mer
Eceeee	European Council for an Energy Efficient Economy
ECLORE	Emplois et compétences locales de la rénovation performante
ECS	eau chaude sanitaire
EDF	Électricité de France SA
EDITS	Energy Demand Changes Induced by Technological and Social Innovations
EEIO	environmentally-extended input-output
EEMRIO	environmentaly extended multi-regional input-output
EER	energy efficiency ratio
EnerMED	Energy model – Energy Demand
EnerNEO	Energy model – National Energy Outlook
ENL	Enquête nationale logement
ENPC	École nationale des ponts et chaussées
EHPAD	établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes
EPCI	Établissement public de coopération intercommunale
EPDM	éthylène - propylène - diène monomère
ÉQUITÉE	Équilibres territoriaux – Énergie, environnement
ETH Zurich	École polytechnique fédérale de Zurich
ETP	équivalent temps plein
ETS	Emissions Trading System
FCBA	Institut technologique forêt, cellulose, bois-construction et ameublement
FBFC	formation brute de capital fixe
FFB	Fédération française du bâtiment
FNAIM	Fédération nationale de l'immobilier
GEODIP	Géolocaliser et diagnostiquer la précarité énergétique
GES	gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPEC	Gestion prévisionnelle des emplois et des compétences
GPL	gaz de pétrole liquéfié
GRDF	Gaz réseau distribution France
GRTgaz	Gestionnaire de réseau de transport de gaz
HLM	habitation à loyer modéré
HPC	calcul haute performance
HQE	Haute qualité environnementale
HTA	haute tension A (réseau de distribution électrique)
I4CE	Institut de l'économie pour le climat

IA	Intelligence artificielle
IAM	integrated assessment model
IDDRi	Institut du développement durable et des relations internationales
IGCE	industries grandes consommatrices d'énergie
IGEDD	Inspection générale de l'environnement et du développement durable
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
IMACLIM-R	Impact Assessment of Climate policies
Inria	Institut national de recherche en informatique et en automatique
INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace
IRIS	îlots regroupés pour l'information statistique
ISDD	installation de stockage de déchets dangereux
ISDI	installation de stockage de déchets inertes
ISDND	installation de stockage de déchets non dangereux
ITOM	Installation de traitement des ordures ménagères
LC	logements collectifs
MatMat	Matrice matériaux
MEDEE	Modèle d'évolution de la demande d'énergie
MEG	modèle d'équilibre général
MENFIS	Modèle énergie et fiscalité
Mésange	Modèle économétrique de simulation et d'analyse générale de l'économie
METIS	Markets and Energy Technologies Integrated Software
MFA	material flow analysis
MI	maisons individuelles
MICO	Modélisation des Impacts de la Climatisation sur la consommation
MO ou MOA	maîtrise d'ouvrage
MODEIRE	Modélisation décarbonation de l'industrie et ressources
Modèle SnW	modèle du scénario négaWatt
MOSAIC	Modélisation simulation et analyse des flexibilités de consommation
MosUT	Modélisation systémique de l'usage des terres
MSC	matrice de comptabilité sociale
NAF	Nomenclature d'activités française
NEO	Netherlands Economic Observatory
ODYM-RECC	Open Dynamic Material Systems Model for the Resource Efficiency-Climate Change Nexus
OFCE	Observatoire français des conjonctures économiques
OID	Observatoire de l'immobilier durable
ONG	organisation non gouvernementale
ONF	Office national des forêts
ONPE	Observatoire national de la précarité énergétique
ONRE	Observatoire national de la rénovation énergétique
OPCO	Opérateur de compétences
Opex	operating expenditures (dépenses d'exploitation)
OTELO	Outil de territorialisation des besoins en logements
PAC	pompe à chaleur

PACTE	Plan d'action pour la croissance et la transformation des entreprises
PCAET	Plan climat air énergie territorial
Pépit0	Perspective d'évolution de la production industrielle pour une trajectoire zéro carbone
PERSEE	Centre Procédés, énergies renouvelables et systèmes énergétiques
PIB	produit intérieur brut
POLES	Prospective Outlook on Long-term Energy Systems
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
PLH	Programme local de l'habitat
PLU et PLUi	Plan local d'urbanisme, et Plan local d'urbanisme intercommunal
PREBAT	Programme d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment
Prometheus	Programme de microsimulation des énergies du transport et de l'habitat pour évaluations sociales
PTEF	Plan de transformation de l'économie française
PUE	power usage effectiveness
PV	photovoltaïque
PVC	polychlorure de vinyle
R4RE	Plateforme resilience for real estate
R & D	recherche et développement
RCP et SSP	scénarios dits Representative Concentration Pathways et Shared Socio-economic Pathways
RCU	réseau de chaleur urbain
RE2020	Réglementation environnementale des bâtiments neufs
RENOMAT	Modèle Rénovation et matériaux
REP-PCMB	Responsabilité élargie du producteur - produits et matériaux de construction du bâtiment
Res-IRF	Residential module of IMACLIM-R France
RETI	Research Institute of Innovative Technology for the Earth
RGPD	Règlement général sur la protection des données
RP / RS	résidence principale / résidence secondaire
RSEE	Récapitulatif standardisé des études énergétiques et environnementales
RTE	gestionnaire du Réseau de transport d'électricité
SCoT	Schéma de cohérence territoriale
SDES	Service des données et études statistiques
Secten	inventaire Secteurs économiques et énergie
SEVS	Service de l'économie verte et solidaire
SFEC	Stratégie française énergie et climat
SHAB	surface habitable
SHAPE	Simulations physiques pour l'aide à la planification énergétique
SHON	surface hors œuvre nette
SIEL	Syndicat intercommunal d'énergie de la Loire
SIREN	Système d'identification du répertoire des entreprises
SIRET	Système d'identification du répertoire des établissements
Sirene	Base des entreprises et de leurs établissements (SIREN, SIRET)
SNBC	Stratégie nationale bas carbone
SRADDET	Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
SRCAE	Schéma régional climat air énergie

SRIO	single region input-output
TEE	taux d'effort énergétique
TERI	tableau emplois/ressources interactif
TES	tableau entrées-sorties
TETE	Transition écologique territoire emploi
ThreeME	Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy
TiTAN	Trajectoires optimisées des technologies d'abattement pour la neutralité carbone
TRACC	Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique
USES 2	Modèle Usages spécifiques de l'électricité
VAN	valeur actuelle nette
VE	véhicule électrique
VEFA	vente en l'état final d'acquisition
VRD	voirie et réseaux divers
ZAN	zéro artificialisation nette

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME

FAITS ET CHIFFRES



L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.

CLÉS POUR AGIR



L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.

ILS L'ONT FAIT



L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.

EXPERTISES



L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard

HORIZONS



L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



EXPERTISES

BÂTIMENT ET IMMOBILIER : MIEUX MODÉLISER LA TRANSITION

L'analyse de l'écosystème français de modélisation des bâtiments montre que les modèles représentant le lien énergie-bâtiment constituent l'épine dorsale de l'écosystème et permettent de capturer un large éventail de défis techniques et économiques (électrification, création d'emplois...), ainsi qu'un ensemble émergent de modèles axés sur les ressources et la demande de matières premières.

Toutefois, l'étude met clairement en évidence la nécessité de poursuivre les développements. Certains, tels que les variations dans les projections démographiques, les projections au-delà de 2050... ne nécessitent que des ajustements mineurs pour que les modèles les prennent en compte. D'autres nécessiteraient un développement plus important, par exemple pour intégrer un plus large éventail d'impacts environnementaux, ou pour introduire des boucles de rétroaction entre les modèles afin de mieux refléter l'interaction entre la demande et l'offre (emplois, ressources...). Enfin, la communauté des modélisateurs doit renforcer sa capacité à contribuer à la réflexion sur la résilience face aux crises ou aux grandes tendances sociales et économiques (numérisation, évolution des marchés immobiliers...).

Cette étude analyse l'écosystème français de modélisation du bâtiment et de l'immobilier afin de mieux comprendre sa contribution actuelle aux scénarios de transition écologique du secteur, mais aussi les champs à investir dans le futur.

