

Table des matières

Introduction générale	3
1 Conception et construction des bâtiments	7
1.1 Calculs conventionnels	7
1.2 Labels et certifications	9
1.3 Logiciels de simulations thermiques dynamiques	9
1.3.1 Logiciels simplifiés	10
1.3.2 Comfie+Pleiades	11
1.3.3 DYMOLA	11
1.3.4 EnergyPlus	12
1.3.5 ESP-r	12
1.3.6 IDA-ICE	13
1.3.7 TRNSYS	13
1.4 Optimisation de projet	13
1.5 Synthèse	14
2 Performance énergétique théorique et réelle	16
2.1 Le <i>performance gap</i>	16
2.2 Influence du simulateur	17
2.3 Influences des usagers	18
2.3.1 Paramètres influents le comportement	19
2.3.2 Part aléatoire du comportement	20
2.3.3 Accessibilité aux systèmes	20
2.3.4 Impact des interactions sociales	20
2.3.5 Interactions collatérales	21
2.4 Influence des systèmes et de leur maintenance	21
2.5 Influence de la qualité du chantier	22
2.6 De la sociologie à l'ingénierie	22
2.7 Synthèse	23
3 Modélisation du comportement des usagers	25

3.1	Types de modèles	25
3.1.1	Modèles psychologiques	25
3.1.2	Valeurs moyennes	26
3.1.3	Modèles déterministes	26
3.1.4	Modèles probabilistes	27
3.1.5	"Action-based" modèles	28
3.1.6	Systèmes Multi-Agents (SMA)	28
3.1.7	Synthèse des familles de modèles	29
3.2	Choix de la plateforme SMA	31
3.2.1	Brahms	31
3.2.2	Repast	31
3.2.3	Jade	31
3.2.4	NetLogo	31

Introduction générale

Cette introduction présente le contexte mondial, l'organisation et les enjeux de la thèse et enfin le plan de ce manuscrit.

Contexte

La crise économique des années 2010 touche l'ensemble de l'économie occidentale et s'accompagne de la dégradation de plusieurs fondamentaux sociaux et environnementaux de notre société. Cette situation nous oblige à repenser nos modèles de développement et en particulier à nous interroger sur l'avenir de l'énergie qui fonde le développement du monde que l'on connaît. Comme le confirme à chaque rapport le GIEC [1], abondante et bon marché depuis la seconde révolution industrielle, l'énergie fossile apparaît aujourd'hui et depuis les chocs pétroliers comme rare et de plus en plus chère dans un contexte où la menace du changement climatique se renforce. Accentué par l'évolution démographique, c'est dans ce contexte que le controversé essayiste et scientifique Rifkin [2] promeut la troisième révolution industrielle et considère la transition vers des systèmes énergétiques décarbonés comme prioritaires. Néanmoins la démarche de transition énergétique (Energiewende) est à mettre au crédit de l'Allemagne de 1980 qui a été le précurseur mondial de l'application d'énergie renouvelable à l'échelle industrielle. En France et à la suite du Grenelle de l'Environnement¹, cette transition énergétique est partagée par la grande majorité des politiques, afin d'atteindre l'engagement national du facteur 4² en 2050, tout en restant compétitif sur les marchés internationaux. L'association Negawatt³ a une forte notoriété pour la mise en œuvre de la transition énergétique de manière concrète et plus technique que le travail de Rifkin.

Cette contrainte de réduction des consommations d'énergie confronte nos sociétés à un défi d'une ampleur considérable. La consommation d'énergies fossiles à grande échelle est le socle qui a rendu possible le développement de nos sociétés modernes où aucune activité humaine n'échappe à la consommation d'énergie. En occident, le premier secteur consommateur d'énergie est le bâtiment, suivi des transports et de la production industrielle *Refenfindethese*. Pour parvenir à l'objectif d'une société plus sobre en énergie, le secteur du bâtiment est donc une priorité tant son potentiel est jugé important et accessible à moyen terme. Compte tenu de l'état des technologies et par rapport aux transports, le bâtiment apparaît comme le domaine le plus mature pour la transition énergétique.

Cette amélioration continue des performances énergétiques des bâtiments neufs et anciens a été accompagnée par le développement d'outils de plus en plus performants et précis en termes de modélisation numérique. A l'inverse des premiers outils de calcul des déperditions statiques ne tenant même pas compte des apports solaires, les outils de simulations thermiques dynamiques actuels permettent d'intégrer l'ensemble des paramètres influençant le fonctionnement d'un bâtiment : cli-

1. Le Grenelle de l'Environnement est le fondement de la transition environnementale et énergétique. Site internet : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Le-Grenelle-de-l-environnement-de-.html>

2. Le facteur 4 en France correspond à une réduction des émissions par quatre des GES entre 1990 et 2050

3. La sémantique du terme Negawatt quantifie une puissance en moins, c'est-à-dire une puissance économisée par un changement de technologie ou de comportement. Site internet de l'association : <http://www.negawatt.org/>

mat, physique du bâtiment, équipements et usages. Alors que le niveau d'incertitude concernant les paramètres statiques liés à l'enveloppe, tels que les propriétés des matériaux ou le contrôle qualité de chantier, sont de plus en plus faibles, les incertitudes sur l'utilisation effective du bâtiment et le comportement des utilisateurs sont quant à elles très importantes. En résulte dans la pratique des écarts parfois considérables entre consommations théoriques et mesurées, d'autant plus élevés que la performance du bâtiment est grande. Au travers de l'amélioration des modèles des bâtiments, cette thèse doit permettre de mieux prendre en considération le comportement des usagers notamment par un état de l'art d'études sociologiques appliquées à l'énergétique du bâtiment et de développer un module de simulation pour le bureau d'études, AI Environnement⁴, la structure d'accueil.

Force collective

Comme nous venons de le voir, les pouvoirs publics ainsi que les associations non gouvernementales prennent des mesures pour panser les maux de notre monde. Certes, les moyens ne semblent pas toujours à la hauteur des enjeux, néanmoins les comportements individuels peuvent mener à des améliorations significatives. Cette philosophie a été imagée par l'histoire du mouvement Colibris⁵ de Pierre Rabhi : "Un jour, il y eut un immense incendie dans la forêt, seul un colibri déposa, goutte après goutte, de l'eau sur les arbres. "Tu crois que ce sont tes gouttes d'eau qui vont arrêter l'incendie ?", se moquèrent les autres oiseaux. Et le colibri de répondre : "Seul, non, mais j'aurais fait ma part." Le projet de la tour Elithis de Dijon⁶, se voulant être le premier bâtiment tertiaire à énergie positive, est un exemple d'application du mouvement Colibris. Lors de sa mise en service la tour ne consommait que $20 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$, soit six fois moins qu'un bâtiment tertiaire standard, mais toujours $20 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ de trop pour véritablement atteindre l'objectif. Or, ce n'est pas un acharnement technologique qui a permis cela, mais l'accompagnement des employés vers des comportements en adéquation avec ce bâtiment et son environnement.

Colibris et les mouvements semblables sont des accélérateurs de transition, en s'appuyant sur la capacité de chacun à changer et à incarner ce changement dans des expériences concrètes et collectives. Cela encourage l'émergence et l'incarnation de nouveaux modèles de société fondés sur l'autonomie, l'écologie et l'humanisme.

"Les Colibris, ce sont tous ces individus qui inventent, expérimentent et coopèrent concrètement, pour bâtir des modèles de vie en commun, respectueux de la nature et de l'être humain." P. Rabhi

Thèse en entreprise

Le travail présenté dans ce manuscrit est le produit d'une thèse en contrat CIFRE⁷ c'est à dire co-financée par une entreprise, supervisée par un laboratoire et subventionnée par l'ANRT⁸. Dans une démarche d'innovation et pour structurer ses activités de recherche et développement, AI Environnement, le bureau d'études techniques et Antoine Boulla, ingénieur d'étude et encadrant principal de la thèse, ont ressenti le besoin de mieux appréhender le comportement des usagers pour leurs études énergétiques. C'est dans ce contexte que la synergie avec l'Université de La Rochelle, par l'entremise de Christian Inard et Jean-Marc Ogier respectivement du LaSIE⁹ et L3I¹⁰ s'est établie.

4. Site internet : <http://www.ai-environnement.fr/>

5. Site internet : <https://www.colibris-lemouvement.org/>

6. Site internet : <http://www.elithis.fr/realisation/tour-elithis/>

7. CIFRE : Convention Industrielle de Formation par la Recherche. Pour en connaître les modalités concrètes : http://www.anrt.asso.fr/fr/espace_cifre/accueil.jsp

8. Association Nationale de la Recherche et de la Technologie. Site internet : <http://www.anrt.asso.fr/>

9. Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement. Site Internet : <http://lasie.univ-larochelle.fr/>

10. Laboratoire Informatique, Image et Interaction. Site Internet : <http://l3i.univ-larochelle.fr/>

Afin de pouvoir confronter les résultats du modèle à des données réelles, Bassam Moujalled, membre du CEREMA¹¹, a été greffé dès le début du projet de thèse pour sa connaissance de la modélisation dynamique des bâtiments et sa proximité à des projets expérimentaux tests. Enfin, à la suite d'un Master en Sciences et Techniques des Environnements Urbains à l'Ecole des Mines de Nantes, j'ai complété le groupe de travail afin de réaliser et articuler le projet.

La thèse en contrat CIFRE s'inscrit dans une logique de don contre-don où, par l'intermédiaire du doctorant, AI Environnement s'est lié à l'expérience de laboratoires de l'Université de La Rochelle tandis que les laboratoires ont recadré leurs activités de recherches aux besoins de la structure industrielle. Au milieu de cette synergie, le doctorant se retrouve parfois en situation inconfortable où il doit trouver l'équilibre entre les attentes des différentes parties tout étant l'acteur et le décideur principal du projet.

Au travers d'une telle thèse, le doctorant a un rôle d'interface entre le monde universitaire et le monde industriel. Bien que certains recruteurs voient encore la formation doctorale comme non professionnalisante, la CIFRE est vue d'une autre manière et tend à faire évoluer les mentalités. Les recruteurs industriels trouvent chez ces docteurs des compétences de pointe, d'une part de chercheur et d'autre part d'ingénieur familiarisé au milieu professionnel associé : double compétence valorisable.

Enjeux de la thèse et contribution

C'est donc dans un contexte partagé entre le bureau d'études et les laboratoires, que cette thèse contribue à améliorer les résultats des projets thermiques et environnementaux. La recherche de hautes performances énergétiques et environnementales amène les bureaux d'études techniques à réaliser des STD (Simulations Thermiques Dynamiques) afin d'optimiser les constructions et rénovations en diminuant leurs consommations et en améliorant le confort des occupants. Le constat est que la prise en compte du comportement de ces derniers est actuellement le maillon faible de ce genre d'études. Face au manque d'informations concernant le comportement réel des usagers et leurs interactions avec le bâtiment, les thermiciens et énérgéticiens sont contraints à en simplifier les hypothèses d'entrée. En effet, aujourd'hui ce comportement humain est grossièrement réduit à un taux d'occupation, une présence journalière répétitive via une approche très déterministe.

De nombreuses raisons ont été avancées pour expliquer la non-précision et la non-fiabilité des résultats des études de STD. Cependant, les résultats de l'Annexe 53 [3]¹², *Total Energy Use in Buildings : Analysis and Evaluation Methods*, projet de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), montrent que la principale cause d'incertitude provient de la mauvaise prise en compte du comportement des occupants. Dans la continuité à ce projet, l'Annexe 66, *Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings*¹³ a été lancée avec des objectifs et des problématiques de recherche qui coïncident à ceux de la thèse, à savoir :

- Identification quantitative et classification du comportement des occupants sur les besoins énergétiques du bâtiment
- Création d'une base de données sur les comportements des occupants au sein des modèles
- Implémentation des modèles dans les outils de simulations énergétique des bâtiments
- Évaluation des modèles de comportement développés par des études de cas

L'intérêt de cette Annexe et la période de travail (2014-2017) m'a donc amené à intégrer ce groupe de travail international et à participer aux différentes réunions (Université de Nottingham, Université de Berkley, ...). Des participations à ces types de regroupements font parties du travail des chercheurs, car elles permettent d'échanger et de mettre en commun les connaissances et avancées.

11. CEREMA : Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
<http://www.cerema.fr/>

12. Présentation et publications : <http://www.iea-ebc.org/index.php?id=141>

13. Site internet : <http://www.annex66.org/>

Plan du manuscrit

Nous proposons une lecture du manuscrit qui peut être découpée en plusieurs parties...

Chapitre 1

Conception et construction des bâtiments

Ce premier chapitre ouvre la thèse en présentant les différentes phases de la construction d'un projet de bâtiment. Ces phases sont aujourd'hui normées et chaque acteur de la construction a un rôle bien déterminé dans ce processus. La liste suivante présente alors ces étapes et les acronymes utilisés :

1. Étudier la faisabilité du projet architectural et autorisation. Le maître d'ouvrage rencontre un architecte et un programmiste pour réaliser les études d'avant projet : ESQ (Etudes d'esquisses), APS (Avant-Projet Sommaire), APD (Avant-Projet Définitif) et DPC (Dossier de demande de Permis de Conduire)
2. Conception détaillée du bâtiment : PRO (Études de PROjet)
3. Planification de la construction : DCE (Dossier de Consultation des Entreprises) et plans d'exécution
4. Sélection des entreprises de la construction : ACT (Assistance aux Contrats de Travaux)
5. Chantier : DET (Direction de l'exécution des travaux) et OPC (Ordonnancement, coordination et Pilotage du Chantier)
6. Livraison du bâtiment au maître d'ouvrage : AOR (Assistance aux Opérations de Réception)

Cette liste montre d'une part la chronologie des différentes phases de la conception des bâtiments et nous permet d'autre part d'avancer qu'une gestion intégrée de ces étapes peut améliorer l'efficacité de la construction. Cela passe par une implication davantage holistique des bureaux d'études, artisans, entreprises de constructions, exploitant et occupant dès les premières phases du projet.

Du point de vue du bureau d'étude thermique et environnement, la conception ou la rénovation de bâtiments, rime avec évaluation des performances futures des constructions. Concernant l'environnement nous verront dans ce chapitre que des certifications permettent d'aller au delà des exigences du code de l'environnement. A propos de l'énergétique, nous verront que se sont les labels énergétiques qui permettent d'évaluer les exigences de performances en comparaison à la réglementation thermique. L'évaluation de ses niveaux de performance a été accompagné d'outils permettant de les quantifier. Nous nous intéressons ici particulièrement à la Simulation Thermique Dynamique (STD) qui est de plus en plus intégrée au processus de conception des bâtiments et qui permet théoriquement de modéliser son fonctionnement réel. Une comparaison de ces outils est proposé en fin de chapitre.

1.1 Calculs conventionnels

Afin d'inciter les maîtres d'œuvre et d'ouvrage à améliorer les performances énergétiques de leurs bâtiments, des réglementations thermiques évolutives ont été mise en place afin de créer un seuil

minimum en terme de performance énergétique. La première réglementation fait suite au premier choc pétrolier de 1973 qui a déclenché une prise de conscience de la nécessité d'économiser l'énergie. Sa mise en place concerne les bâtiments neufs et date de 1974. Aujourd'hui, la Réglementation Thermique en vigueur est la RT 2012, elle précède la future RT 2020 et s'inscrit dans la continuité des RT 2005, 2000, 1988 et 1974 aux exigences croissantes. Depuis 2000, ces réglementations thermiques expriment des exigences sur les résultats en énergie primaire, alors que les RT antérieures imposent des exigences de moyens, d'où leur absence sur la Figure 1.1. En effet, bien que depuis 1974 les performances s'améliorent, une comparaison quantitative des deux premières RT n'est pas significative avec les dernières. Impulsé par le Grenelle de l'Environnement les acteurs du bâtiments se préparent à une nouvelle évolution significative des performances pour la RT 2020. Outre des améliorations techniques des matériaux, la RT 2020 devra également prendre en considération les usages de l'électricité spécifique (appareils ménagers, boxes, TV, etc.), l'énergie grise des constructions ainsi que de la mobilité qui est liée à la densité urbaine environnante. Les bâtiments BEPOS sont associés à la RT 2020 et trouvent leurs légitimités en zones denses lorsqu'ils sortent du cadre unique du bâtiment pour aller vers un BEPOS collectif : l'îlot, le quartier, la ville.

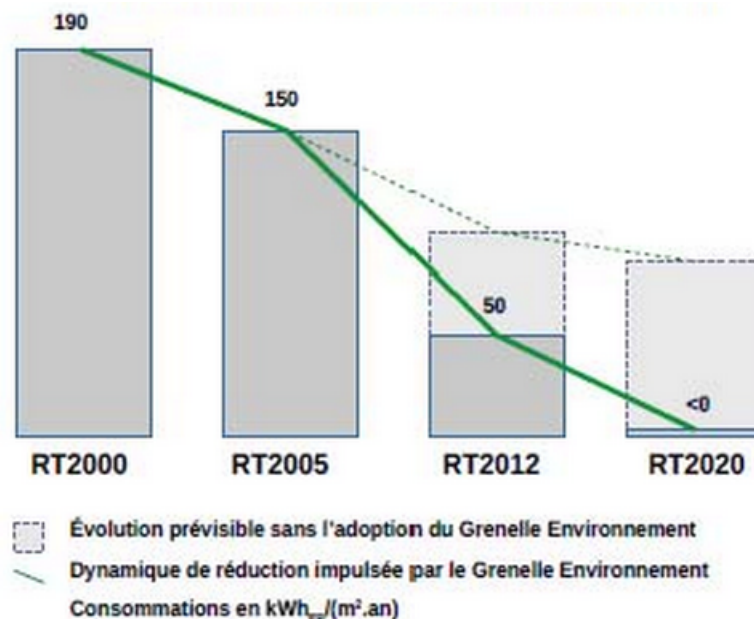


FIGURE 1.1 – Évolution des exigences réglementaires de consommation énergétique des bâtiments neufs : une rupture opérée par le Grenelle Environnement. Source : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie

La méthode de calcul actuelle Th-B-C-E 2012 n'a pas pour vocation de faire des calculs de consommations réelles, elle utilise comme données d'entrée tous les éléments descriptifs du bâtiment et de ses équipements. Les éléments apportés après la réception du bâtiment ainsi que les paramètres indépendants du bâtiment intervenant dans la méthode sont définis de façon conventionnelle : il s'agit notamment des données climatiques et celles relatives à l'usage des bâtiments. Il est alors possible de confirmer que les bâtiments sont aux normes thermiques et qu'ils peuvent effectivement être construits ou encore de comparer les bâtiments les uns aux autres d'un point de vue thermique et énergétique sans que l'ingénieur d'étude n'ait d'impact sur les résultats.

Plusieurs logiciels ont été développés en suivant le moteur de calcul Th-B-C-E 2012, lui même développé par le CSTB afin de vérifier la conformité d'un projet à la RT2012. Sans détailler les carac-

téristiques de ces logiciels, les plus répandus sont Clima-Win¹, CYPE², DesignBuilder³, Perrenoud⁴ et le module RT2012 Pleiades+COMFIE⁵.

Le prochain chapitre évoque les labels et certifications et montre alors qu'il est fréquent que les maîtres d'ouvrages éprouvent la volonté de construire des bâtiments plus performants que ce que les réglementations fixent. Le chapitre d'après traite lui des Simulations Thermiques Dynamiques qui ont plus de flexibilité que les calculs réglementaires et qui permettent aussi des évaluations dans le cadre de labelisations et certifications.

1.2 Labels et certifications

Les certifications et labels sont des signes de qualité des bâtiments permettant de les catégoriser selon les modes de construction et les performances. Les certifications garantissent que la construction ou la rénovation, d'une maison ou d'un immeuble, a été réalisée en respectant de strictes exigences en termes de confort, santé, maîtrise des charges et environnement. Les labels valorisent uniquement la performance énergétique des logements, sans tenir compte des autres éléments. La diversité des certifications et labels donnent la possibilité aux constructeurs puis aux futurs acquéreurs de choisir un logement répondant à leurs priorités et souhaits. Une demande de label ne peut se formaliser qu'après une certification.

Plusieurs démarches ont été initiées dans les pays européens pour améliorer et codifier les démarches constructives. Les principes de l'éco-construction peuvent se décliner en France avec la démarche de construction Haute Qualité Environnementale - HQE, définissant 14 cibles dans 4 domaines (éco-construction, éco-gestion, confort et santé) ou la certification *BRE Environmental Assessment Method* BREAM, organisée autour de 10 catégories (gestion, bien-être et santé, énergie, transport, matériaux, eau, déchets, paysage et écologie, pollution et innovation). Les labels, tels qu'Effinergie ne peuvent être obtenus qu'après certification et intègrent donc également les principes de l'éco-construction. Dans les pays voisins, d'autres labels ou certificats, également basés sur les performances énergétiques des bâtiments, sont déployés et synthétisés dans la Figure 1.2, il s'agit de Minergie en Suisse, Passivhaus en Allemagne, LEED en Amérique du Nord ...

L'intérêt de vouloir construire un bâtiment au delà des réglementations est multiple. D'une part il apporte une visibilité au bâtiment car il mobilise des technologies nouvelles qui attisent la curiosité d'autres maîtres d'ouvrage et rendent donc le bâtiment désirable. Dans le domaine public les certifications peuvent être accompagnées de subventions ce qui assure forcément un sur-coût modéré. Aussi, par définition un bâtiment certifié ou labellisé est plus performant que la moyenne et réduira donc ses coûts d'exploitation pour un confort d'habitat également amélioré. Un bâtiment certifié renvoi aussi à l'assurance que les meilleures pratiques de construction ont été intégrées au chantier. Cette assurance de qualité, qui est une marque de reconnaissance, est forcément recherchée car elle peut être valorisée lors de la vente ou lors de la cession du bâtiment. La certification aborde les problèmes environnementaux dans leur globalité et permet aux promoteurs et concepteurs immobiliers de présenter aux urbanistes et à leurs clients les caractéristiques environnementales de leurs bâtiments.

1. Site internet : <http://www.bbs-slama.com/>

2. Site internet : <http://www.cype.fr/>

3. Site internet : <http://www.designbuilder.co.uk/>

4. Site internet : <http://www.logicielsperrenoud.com/>

5. Site internet : <http://www.izuba.fr/>



FIGURE 1.2 – Carte du monde montrant les pays avec leurs propres certifications environnementales

1.3 Logiciels de simulations thermiques dynamiques

Évaluer les besoins annuels de chauffage ou de rafraîchissement d'un bâtiment requiert de disposer de très nombreuses données permettant de décrire précisément l'enveloppe du bâtiment, les conditions météorologiques et l'usage du bâtiment. À partir de ces éléments, il est possible d'appliquer les lois de la thermique propres aux différents types d'échanges thermiques (convection, conduction, rayonnement) pour en déduire les puissances instantanées mises en jeu à un instant donné. Pour obtenir des résultats théoriques proches des résultats réels, les logiciels de Simulation Thermiques Dynamiques permettent de considérer l'ensemble des paramètres influant à chaque pas de temps de la simulation. Les prochains paragraphes présentent des logiciels certifiés ou non du domaine privé et de la recherche. Pleiades+COMFIE, DYMOLA⁶, EnergyPlus⁷, ESP-r⁸, IDA-ICE⁹ et TRNSYS¹⁰ sont les logiciels qui ont à un moment donné retenus notre attention pour la réalisation de cette thèse et sont alors présentés en détails dans ce qui suit. Beaucoup d'autres logiciels existent pour modéliser et simuler les bâtiments dans leur environnement mais ne sont pas présentés ici : Virtual Environment, DOE, Climawin ou encore ArchiWizard parmi les plus répandus.

Avec l'accroissement des exigences de performance énergétique et environnementale sur les nouveaux bâtiments, la STD est de plus en plus intégrée au processus de conception des bâtiments. Cela ne l'empêche pas d'être également appropriée dans des projets de rénovation, qui sont souvent plus difficiles à gérer car les informations concernant le bâti existant ne sont pas toujours disponibles. Par ailleurs, les Simulations Thermiques Dynamiques sont utilisées aussi bien pour le confort d'été que d'hiver. Les STD permettent d'estimer les consommations réelles d'énergie, le plus souvent au pas de temps horaire. De nombreux logiciels ont été développés afin de simuler un système, un bâtiment, qui n'est pas à l'équilibre.

6. Site internet : <http://www.dymola.com/>

7. Site internet : <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

8. Site internet : <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>

9. Site internet : <http://www.equa.se/index.php/en/ida-ice>

10. Site internet : <http://www.trnsys.com/>

1.3.1 Logiciels simplifiés

Dans le cadre de projets nécessitant une simulation thermique dynamique pour une application particulière, il peut être nécessaire de développer son propre outil. Kampf et Robinson [4] ont développés un modèle simple basé sur des équivalences électriques, cinq résistances et deux condensateurs afin d'étudier les flux de chaleur dans le bâtiment. Le principe de cette approche est basée sur une analogie entre la thermique et l'électricité. Le bâtiment est assimilé à un circuit électrique où les résistances électriques représentent les résistances thermiques (murs, fenêtres, toit, sol) et les condensateurs représentent l'inertie du bâtiment. Ce modèle électrique, 5R2C, a été repris par Darakdjian [5] de l'Ecole des Mines de Nantes pour réaliser une étude de STD des bâtiments à l'échelle du quartier urbain. Pour cela, le modèle simplifié de Kampf et Robinson est couplé à un outil de Système d'Information Géographique développé par l'IRSTV : OrbisGIS. Cela permet d'obtenir en sortie des informations géolocalisées sur les performances des bâtiments à l'échelle de l'ilot urbain. Les résultats absolus sont certes moins fiables que des logiciels spécialisés mais adaptables et viables en temps de calculs.

Dans le cadre de la garantie de performance énergétique, ces logiciels simplifiés ne permettent pas d'obtenir des résultats pouvant être contractualisés, car ils sont incomplets pour une étude globale et non validés par les autorités compétentes, tel que le CSTB¹¹. On comprend alors aisément que l'utilisation de logiciels commercialisés, comme ceux des prochaines sous-sections sont plus appropriés à une démarche de fiabilité de résultats.

Cette section peut paraître surprenante ici mais montre surtout que pour répondre à un objectif donné, il faut savoir trouver ou créer un outil adapté.

1.3.2 Pleiades+COMFIE

L'outil de simulation thermique dynamique français, COMFIE, est développé par l'école des Mines de Paris et l'interface Pleiades par IZUBA Énergies. L'ensemble Pleiades+COMFIE se démarque de beaucoup de logiciel de STD par l'ergonomie de l'interface utilisateur et à stabilité du logiciel. Aussi, la qualité de l'assistance technique participe à ce que le logiciel soit en France le plus utilisé par les bureaux d'études thermique. Le logiciel Alcyone, également développé par IZUBA, a été incorporé à Pleiades+COMFIE afin de réaliser la saisie graphique et de visualiser le rendu 3D. En sortie de simulation, l'exploitation de résultats est à un niveau avancé avec notamment des diagrammes de Sankey ou des zones de Brager générables. Bien que Pleiades+COMFIE soit fortement apprécié par les utilisateurs en bureau d'études pour son confort d'utilisation, l'accessibilité au cœur du logiciel est nulle. Ainsi, dans un cadre de recherche, l'utilisation de Pleiades+COMFIE permet des études de sensibilité, mais empêche toute extension ou de développement de modules, qui est réservé aux développeurs d'IZUBA.

A ce propos, Vorger et al. [6] des Mines ParisTech ont travaillé sur l'amélioration de la prise en compte du comportement humain dans le logiciel en intégrant les activités des occupants par une modélisation stochastique. Ce travail consiste à générer aléatoirement des ménages et leurs équipements en ce basant sur des données statistiques de l'INSEE. A partir de la génération de ces ménages les activités de chaque occupant sont également générés, ce qui permet d'y associer des consommations énergétiques. En réalisant plusieurs simulations, l'aspect stochastique de l'étude permet alors d'obtenir une fourchette de consommations, qui aide à s'engager dans le cadre d'un processus de garantie de performance énergétique avec un risque d'erreur réduit.

11. Site internet : <http://www.cstb.fr/>

1.3.3 DYMOLA

DYMOLA (*DYnamic MOdelling LABoratory*) est un outil de modélisation et simulation, orienté R&D et développé par Dassault Systèmes. Il permet de modéliser de manière pratique des systèmes dynamiques complexes sans se limiter au domaine du bâtiment. Bien que d'un intérêt limité dans notre cas, DYMOLA peut également permettre de modéliser des systèmes hydrologiques, électriques, ou encore relatifs au transport routier. Encore relativement peu utilisé dans le secteur du bâtiment, il est tout de même apprécié pour la description des systèmes énergétiques. En plus de la bibliothèque standard qui couvre plusieurs domaines d'ingénierie, les utilisateurs peuvent créer leurs propres bibliothèques de modèles pour leurs besoins spécifiques. Michaelsen et Eiden [7] ont développé la leur pour la prédiction du confort de l'occupant en se basant sur les travaux danois de Fanger, reportés par Charles [8] sur les votes moyens prédis (*Predicted Mean Vote* en anglais).

Gaaloul [9] pour sa thèse a couplé plusieurs outils afin de réaliser une simulation globale d'un bâtiment. Pleiades+COMFIE est dédié à la modélisation de l'enveloppe, TRNSYS à la simulation des systèmes énergétiques du bâtiment, MATLAB/Simulink pour le contrôle de la simulation, BRAHMS pour la simulation du comportement des occupants et enfin DYMOLA pour la modélisation avancée de la VMC double flux. Les trois outils de STD, dont DYMOLA, sont alors couplés entre eux mais également à un modèle du comportement des occupants développé dans BRAHMS.

1.3.4 EnergyPlus

EnergyPlus, développé en Fortran par le département de l'énergie des Etats-Unis d'Amérique, est un des logiciels de simulation énergétique le plus connu dans le monde [10] et le plus utilisé par les chercheurs de l'Annexe 66, *Definition and Simulation of Occupant Behavior*. EnergyPlus découle de la fusion de DOE et BLAST, deux logiciels qui ne sont plus développés. EnergyPlus est un logiciel de simulation autonome sans une interface graphique convivial. L'interface DesignBuilder a alors été intégrée pour réaliser des simulations dans un environnement plus agréable. D'ailleurs, DesignBuilder a été spécifiquement développé autour du moteur EnergyPlus afin de réaliser des calculs règlementaires, des certification LEED, des simulations énergétiques, des calculs aéraulique et des calculs d'éclairément sur une interface conviviale. La saisie graphique de DesignBuilder est basée sur la maquette numérique 3D *Building Information Modeling* BIM ce qui offre la possibilité de réaliser des calculs en coût global à l'aide de fonction d'estimation des coûts de construction, d'énergie et de cycle de vie. Aussi, il existe un module d'optimisation permettant de déterminer les paramètres du bâtiment offrant le meilleur compromis coût, confort et impact environnemental.

Jacob Chapman et al. [11] de l'Université de Nottingham développent pour EnergyPlus un modèle stochastique d'activités couplé à une plateforme multi-agents qui communique directement au logiciel de simulation thermique dynamique, EnergyPlus. Ce modèle stochastique est une véritable plateforme à base d'agents développée par une dizaine de chercheurs (informaticiens, mathématiciens, thermiciens et énergéticiens du bâtiment) au sein de l'Université.

1.3.5 ESP-r

ESP-r est un logiciel de STD *open-source* créé et développé par l'Université de Strathclyde, Ecosse, qui fonctionne principalement sous Linux, gratuit et dont le code source est libre. En plus de modéliser les performances thermiques, il peut modéliser les performances visuels et acoustiques ainsi que les émissions de gaz associés. Les évolutions récentes du logiciel permettent également de modéliser l'aéraulique et l'humidité, ESP-r peut informer l'utilisateur sur les possibilités d'optimisations des performances du bâtiment. L'aspect totalement ouvert du logiciel permet d'une part aux utilisateurs d'accéder au cœur des algorithmes et d'en modifier les propriétés et d'autre part d'échanger avec des programmes extérieurs. Un inconvénient relevé d'ESP-r est le manque de détails et de documentations pour les utilisateurs lors de modélisations complexes.

Pour sa thèse de doctorat Bourgeois [12] l'a utilisé pour simuler l'ensemble des interactions bâtiment-systèmes-environnement, afin d'étudier à quel point les modèles d'interactions personne-milieu, issus des études en milieu réel, peuvent influencer les besoins énergétiques. Bourgeois utilise le module SHOCC (*Sub-Hourly Occupancy Control*) qui permet d'étudier les phénomènes relatifs aux comportement des occupants dans les bâtiments. SHOCC couplé à ESP-r gère alors la position des stores et les besoins des occupants concernant le chauffage. Ce modèle a par la suite été repris par Hoes et al. [13] dans le but d'améliorer la finesse de modélisation de la présence des occupants dans l'espace. Ce modèle baptisé USSU (*User Simulation of Space Utilization*) a alors été associé à la paire SHOCC/ESP-r pour démontrer que les activités des occupants doivent être évaluées en détails pour que les estimations des performances des bâtiments gagnent en fiabilité.

1.3.6 IDA-ICE

Contrairement à Comfie+Pleiade qui apparait comme une boîte noire pour l'utilisateur, le logiciel IDA-ICE¹² est quant à lui totalement ouvert aux modifications avec la possibilité d'accéder au cœur des composants du logiciel. De plus, IDA-ICE peut importer des fichiers de CAD 2D et 3D standards. Il permet l'utilisation des modèles BIM (Maquette numérique du bâtiment) notamment générés, par ArchiCAD ou Revit.

Le projet européen Tribute¹³ a pour objectif de diminuer l'écart entre les performances énergétiques des bâtiments calculées et mesurées en repensant la modélisation du comportement des occupants, les constituants clés du bâtiment (systèmes énergétiques CVC, enveloppe du bâtiment, ponts thermiques, ...) ou encore le vieillissement des matériaux. Pour ce projet, des bâtiments sont monitorés ce qui permet de détecter en temps réel les défauts de performance énergétique des bâtiments en vue d'actions correctives modélisées sous IDA-ICE.

1.3.7 TRNSYS

TRNSYS est développé par l'université de Wisconsin-Madison au Etats-Unis et est commercialisé depuis 1979. Ce logiciel permet d'intégrer toutes les caractéristiques du bâti mais aussi des systèmes de chauffage ou de climatisation afin de réaliser des simulations thermiques dynamiques. A l'image d'EnergyPlus, ESP-r ou IAD-ICE l'accessibilité au coeur de calcul est bonne et le développement de modules annexes libre. La limite principale de TRNSYS est de ne pas pouvoir se connecter avec AutoCAD, ArchiCAD ou Revit pour l'importation et l'exportation de fichiers contrairement aux trois autres logiciels. Le bâtiment doit alors être dessiné sous Google Sketchup puis importé.

Bonte [14] a développé un modèle basé sur le confort thermique et visuel des occupants, à l'Université de Toulouse, qu'il a intégré au logiciel TRNSYS 17. Ce modèle nommé OASys (*Occupants' Actions System*) permet alors de prendre en compte les préférences interindividuelles et permet la simulation des actions des occupants, en fonction leurs sensations thermiques ou visuelles sur différents moyens d'actions tels que : la température de consigne, les stores, les fenêtres, l'éclairage ou la tenue vestimentaire. Ce modèle du comportement de l'occupant par intelligence artificielle fonctionne en deux phases : une phase d'apprentissage et une phase d'exploitation où les agents réalisent les actions qui leurs permettent d'améliorer leur confort.

1.4 Optimisation de projet

L'optimisation de projet est assimilée aux changements et améliorations dont les bâtiments sont conçus. La maquette numérique du bâtiment, aussi appelé BIM (*Building Information Modeling*), la

12. Site internet <http://www.equa-solutions.co.uk/fr/logiciel/idaice>

13. Site internet : <http://www.tribute-fp7.eu/>

démarche de conception intégrée et le commissionnement apparaissent de plus en plus souvent dans la conception et construction des bâtiments.

Le BIM a été inventé pour décrire la Conception Intégrée par Ordinateur en 3D, orientée objet. C'est un outil qui permet une description fine, unique et qui facilite la coordination entre les ingénieurs, les fabricants et les constructeurs. La modélisation des données du bâtiment est alors la représentation en format numérique des données du bâtiment. Les données paramétriques résultant du BIM permettent de réaliser des estimations, des simulations, des calendriers et des analyses énergétiques précis.

La Démarche de Conception Intégrée (DCI) repose sur une approche holistique de la conception des bâtiments. Elle rassemble les principaux partenaires et professionnels de la conception, de la construction et de l'occupation en une équipe qui collabore et interagit à toutes les étapes du projet, de la planification initiale jusqu'à l'occupation du bâtiment. De nombreux acteurs reconnaissent la valeur des DCI et y recourent déjà. L'adoption du BIM au sein d'un processus de conception intégrée aide les équipes de conception à déterminer les objectifs et leur fournit un mécanisme pour les atteindre. Une équipe de conception dont les participants travaillent tous avec la BIM, est plus apte à visualiser les problèmes, à analyser les éléments potentiellement conflictuels, à offrir des solutions créatrices et, finalement, à éviter les erreurs de conception. La productivité est alors accru pour tous les acteurs qui travaillent d'une part sur des fichiers uniques mais aussi avec gestion intelligente des phases du projet.

Les phases de construction des bâtiments passent de plus en plus par une supervision extérieure au projet, appelée le commissionnement, qui vise à réduire le risque de non-atteinte des objectifs. Le commissionnement est donc un processus d'assurance de la qualité appliquée à la maîtrise de l'énergie qui s'étend de la programmation à l'exploitation du bâtiment. L'intérêt d'une telle mission sur un projet de construction n'est néanmoins pas qu'énergétique, il s'étend à la productivité générale. Mills et al. [15] dans une étude menée par le *Lawrence Berkeley National Laboratory* sur la comparaison d'une soixantaine d'opérations aux Etats-Unis ont démontré que les économies non-énergétiques peuvent représenter jusqu'à 92 dollars par mètre carré en plus des économies d'énergie. Ce commissionnement se positionne alors comme superviseur des phases de la DCI et comme assureur de la maîtrise des consommations réelles, sujet du chapitre suivant.

1.5 Synthèse

Ce chapitre nous a permis de constater que les différentes phases de la réalisation d'un projet de bâtiment sont de plus en plus liées entre elles. La valeur de la Démarche de Conception Intégrée (DCI) n'est alors plus à démontrer et se positionne comme un pilier de la construction de bâtiments vertueux. Dès les phases de réflexion du projet les bureaux d'études et entreprise agissant sur la phase du chantier sont intégrés aux maîtres d'ouvrage et aux architectes. Cela permet d'anticiper les contraintes et donc de gagner en efficacité et qualité. Nous avons également vu que l'adoption de la maquette numérique, qui se généralise, est un outil d'homogénéisation des supports de travail des différents acteurs de la conception. Les constructions sont soumises à des réglementations qui fixent des performances minimales et qui sont vérifiés par des calculs conventionnels. Or, il est fréquent que des maîtres d'ouvrage adoptent des démarches de certification (HQE, BREEAM, LEED) et de labellisation (Effinergie, Minergie, Passivhaus) pour garantir de meilleures performances et une meilleure qualité de construction des bâtiments. Pour évaluer la conformité des exigences de ces labels et certifications comme pour optimiser la conception des bâtiments, il peut être nécessaire de réaliser des Simulations Thermiques Dynamiques. Nous avons évoqué les logiciels de STD existants étant soit très répandus, soit potentiellement utilisable pour le projet de thèse. Dans ce cadre, le Tableau 1.1 synthétise les points forts et faiblesses de chacun de ces outils de simulations thermiques dynamiques.

Logiciels	Points forts	Points faibles
Logiciels simplifiés	Personnalisé Rapide en temps de calcul	Non certifiés donc non fiables
Comfie+Pleiade	Convivialité de l'interface Utilisation massive des BE français	Accessibilité et modularité
DYMOLA	Application à des domaines d'ingénieries large	Peu utilisé en bureau d'études
EnergyPlus	Interface convivial Accessibilité et modularité	Peu utilisé en France
ESP-r	Optimisation de projet automatisé Gratuit et libre	Manque de documentation détaillée
IDA-ICE	Accessibilité et modularité	Peu de littérature Peu utilisé en France
TRNSYS	Fréquemment utilisé en bureaux d'études Accessibilité et modularité	Interface peu conviviale Gestion des géométries

TABLE 1.1 – Tableau comparatif des logiciels de STD

La comparaison de ces logiciels STD nous amène à conclure que plusieurs d'entre eux sont considérés comme satisfaisant pour être couplé à une modélisation du comportement des occupants. Comfie+Pleiades est très apprécié des bureaux d'études français mais aucune amélioration n'est possible sans une collaboration avec IZUBA. IDA-ICE, DYMOLA et ESP-r sont flexibles mais manquent de littérature. EnergyPlus, est très largement utilisé dans la recherche internationale mais assez peu dans les bureaux d'études français. TRNSYS semble le logiciel le plus approprié pour notre projet par son accessibilité, son potentiel et sa large utilisation mondiale et française.

Chapitre 2

Performance énergétique théorique et réelle

Nous venons d'évoquer le contexte global de la conception et de la construction sous l'angle d'un bureau d'étude thermique et environnement. Le travail de ce type de structure est de donner des avis d'expert sur les questions énergétiques. Pour cela, les outils numériques comme les Simulations Thermiques Dynamiques sont utilisées pour modéliser les futures constructions et donc prédire leurs performances.

Or des doutes émanent sur la représentativité de chaque modèle et les différences entre les performances énergétiques théoriques et mesurés : le *performance gap*. Les performances des bâtiments sont influencées par de nombreux facteurs, tels que les conditions climatiques, les équipements et la structure du bâtiment, mais aussi des facteurs intervenants en phase d'exploitation, tels que la maintenance, le comportement des occupants et les conditions environnementales externes. Les effets et la modélisation du climat, de l'enveloppe et des systèmes sont bien connus et standardisés alors que ceux en lien à l'utilisation du bâtiment se révèlent être plus incertains. On comprend alors que prédire les consommations totales des bâtiments est un exercice très complexe si l'on considère tous ces éléments.

2.1 Le *performance gap*

Cette partie a pour objectif de mettre en avant les différences entre les consommations théoriques estimées et les consommations réelles en phase d'exploitation du bâtiment. Parmi les raisons expliquant ce que les anglo-saxons appellent le *performance gap*, on retrouve le comportement des occupants, les réglages des systèmes ou encore la qualité du chantier. Cette réflexion s'inscrit dans le cadre de la Garantie de Performance Énergétique (GPE) et de la Garantie de Résultats Énergétique (GRE) organisé par l'ANR¹ Fiabilité des prévisions des performances énergétiques des bâtiments. Ce projet de recherche national est centré sur la question de la fiabilité des codes de simulation thermique et énergétique des bâtiments dont l'utilisation est décisive dans le processus de conception de constructions neuves ou en rénovation.

La remise en question des estimations de la performance énergétique des bâtiments est arrivée dans les années 1990. Ces années coïncident d'ailleurs avec l'apparition des premiers outils numériques estimant les futures performances des bâtiments. Durant cette époque les développeurs de ces outils ont réduits le niveau d'incertitudes concernant les paramètres statiques liés à l'enveloppe des bâtiments. Plus tard, les recherches ont permis de prendre en compte les apports solaires et

1. l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) est une agence qui finance la recherche publique et la recherche collaborative en France, Site internet :<http://www.agence-nationale-recherche.fr/>

autres sollicitations extérieures au bâtiment. Rapidement les chercheurs sont parvenus à modéliser intrinsèquement le bâtiment, mais ont constatés un écart entre la performance estimée par les modèles informatiques et la performance mesurée. Cette différence a été baptisée le *performance gap*. L'équipe de Norford[16] de l'Université de Princeton a été la première à mettre en avant les différences entre les modèles et les résultats sur un bâtiment de bureau modélisé sous le logiciel DOE-2. Ce groupe de recherche, à l'image des chercheurs des années 1990, était conscient que les modèles étaient perfectibles. A cette époque les bâtiments n'étaient pas aussi performants que ceux que nous construisons aujourd'hui, l'impact du comportement des occupants était alors moindre mais pas pour autant négligé. Le point faible principal des modélisations concernait la prise en compte des systèmes CVC (Chauffage Ventilation Climatisation).

Depuis plusieurs dizaines d'années il est facile de trouver des études qui quantifient les écarts entre les consommations théoriques et réelles des bâtiments. Une plateforme collaborative et anonyme, CarbonBuzz², a été lancée pour recenser les *performances gap* des bâtiments. Les résultats montrent généralement des écarts très significatifs, avec des consommations réelles pouvant excéder de 250% les consommations estimées et une moyenne de dépassement comprise entre 150% et 200%. Ces retours d'expériences montrent que les outils informatiques n'ont pas suivis les améliorations continues de la performance énergétique des bâtiments mais qu'il existe tout de même une marge de progression pour cette modélisation.

Nous venons de voir que les logiciels actuels de STD sont perfectibles, néanmoins ces outils ayant vocation à être utilisés dans l'industrie il est essentiel de considérer le coût de ces efforts. Cette démarche de qualité de la modélisation doit être menée dans une logique de recherche d'un optimum entre un niveau raisonnable d'incertitude du modèle et un coût maîtrisé. L'outil idéal que les bureaux d'études souhaitent est fiable mais également simple et rapide à utiliser. A ce propos, l'IFPEB³ dans son rapport, "Consommations énergétiques réelles : comment les prévoir et s'engager ?" [17] présente sous forme de graphiques, Figure 2.1, d'une part que comme la non-qualité, l'ultra perfection est très chère et d'autre part que la précision a un coût.

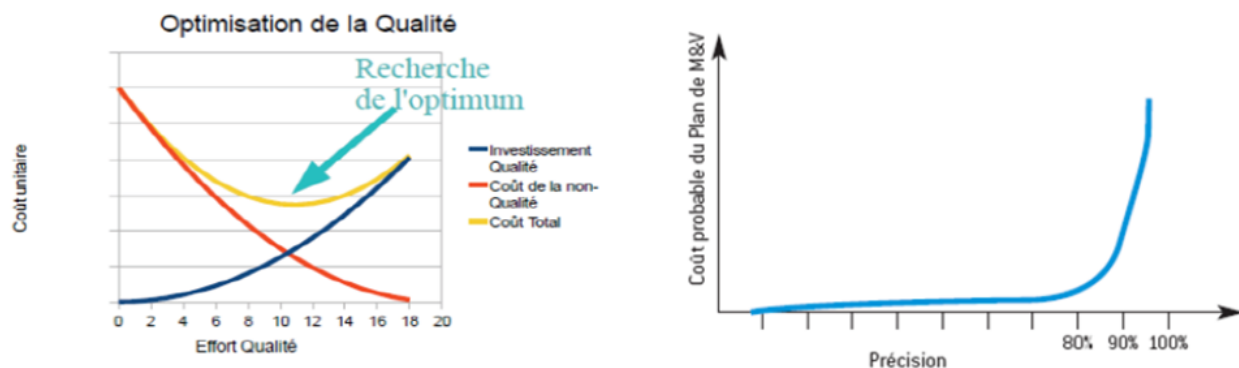


FIGURE 2.1 – A gauche : Recherche de l'optimum entre l'effort de modélisation et prix de la modélisation, A droite : Évolution du prix à payer en fonction de la précision des modèles

2.2 Influence du simulateur

La première cause qui vient à l'esprit lorsqu'un modèle ne parvient pas reproduire la vie réelle, est celle du modélisateur. Cela est justifié puisque les résultats des simulations sont entièrement fonction des hypothèses d'entrée fournies au logiciel. L'IFPEB [17] identifie la bonne définition d'intensité

2. Site internet <http://www.carbonbuzz.org/>

3. Site internet <http://www.ifpeb.fr/>

d'usage comme le premier pilier pour réduire le *performance gap*. Le second pilier pour améliorer les estimations de performances évoque le calcul des consommations prévisionnelles.

A l'évidence un bâtiment doit satisfaire le bien-être des utilisateurs, or trop souvent la conception énergétique est ramenée à la réglementation thermique sans réelle réflexion sur la future utilisation du bâtiment. En effet les retours d'expériences montrent que bien souvent l'usage réel des bâtiments, principalement tertiaires, est très éloigné des hypothèses réglementaires. L'exemple suivant montre l'importance de connaître l'utilisation future du bâtiment lors de la conception : Pour des bureaux si l'hypothèse d'entrée de la STD est basée sur la réglementation thermique alors les employés sont présents de 9h à 19h. Or il est fréquent que les employés ne suivent pas exactement ces horaires et qu'ils travaillent disons une heure de plus par jour. Alors, uniquement cet écart d'hypothèse entraîne une surconsommation énergétique potentielle de près de 10%. Bien concevoir thermiquement un bâtiment nécessite de définir ses conditions d'usages et variation possibles. Une simulation thermique dynamique a alors un intérêt réel que si la programmation de son fonctionnement est aussi détaillée que la composition de l'enveloppe. Enfin, une consommation énergétique par mètre carré est trop réducteur de la performance, comme le précise "la charte pour l'efficacité énergétique des bâtiments tertiaires publics et privés" du Plan Bâtiment Durable [18], l'intensité d'usage est alors préférée dans l'unité de mesure jugée la plus pertinente ($kWh/collaborateur/an$, $kWh/heuredetravail/an$, $kWh/postedetravail/an$,...). Ces unités sont loin d'être généralisées mais prennent de leurs sens lorsque l'on sait que la densité d'occupation peut varier de $8\ m^2$ à $25\ m^2$ par collaborateur [17]. Ce paragraphe montre aussi qu'une consommation donnée en $kWh/m^2/an$ ne renseigne pas sur la performance environnementale. Car finalement un bâtiment très occupé est un bâtiment très efficace.

Le second pilier d'une performance maîtrisée est la bonne prévision des usages nominaux mais également des potentiels d'usages. Pour cela, l'intensité d'usages et les unités fonctionnelles⁴ décrivent correctement ces futurs usages. Les simulations dynamiques peuvent avoir lieu à différentes étapes d'un projet, pour modéliser différentes situations et avec des niveaux de complexité variant en fonction des objectifs. A titre d'exemple une simulation peut servir au dimensionnement de systèmes alors que d'autres nécessitent plus de précision car sont réalisées dans le cadre d'un engagement performanciel. Cela signifie avant tout qu'il faut personnaliser les simulations en fonction des objectifs malgré la complexité pour gagner en fiabilité. Aussi, il faut reconnaître les limites d'un outil et comprendre que la modélisation ne sera jamais entièrement fidèle à la réalité. Certaines hypothèses sur la charge informatique notamment sont souvent approximatives mais à affiner par apprentissage via des retours d'expériences. Le modélisateur joue alors un rôle essentiel dans l'objectif de réduire le *performance gap*, et se doit de bien définir les paramètres influents l'énergétique du bâtiment notamment en fonction de l'intensité d'usage.

2.3 Influences des usagers

Il est confirmé par de nombreux scientifiques, Hoes [13], Kashif [19], Chen [20], que le comportement des usagers est un des paramètres d'entrée influençant le plus les simulations des performances des bâtiments. DeMeester et al. [21] précisent que le comportement impacte particulièrement les consommations dans le cadre de bâtiments fortement occupés. Degelman [22] confirme lui que les simulations énergétiques sont depuis quelques années proches de la perfection mais cela uniquement si les bâtiments sont utilisés de manière routinière et prévisible. Des études de sensibilité sur l'impact du comportement des occupants, tel que l'état de l'art danois de Larsen et al. [23], atteste de la nécessité d'être rigoureux dans la modélisation du comportement vis à vis de l'énergie. Dans ce document technique, 1000 logements similaires sont suivis dans la banlieue de Copenhague et après pondération des résultats, les consommations finales d'énergie montrent d'énormes différences dues à l'attitude des occupants. Toutes ces études montrent alors qu'on peut se retrouver dans une

4. L'unité fonctionnelle représente une quantification d'un poste qui permet de comparer des situations ou scénarios différents

situation où un bâtiment performant peut consommer plus qu'un bâtiment moins performant. Les retours d'expériences montrent aussi que les performances énergétiques réelles des bâtiments sont bien souvent en deçà des espérances des concepteurs.

Ce paragraphe s'inscrit comme un constat que les usagers participent à complexifier la réduction du *performance gap*, et non pas le point de vu d'un ingénieur-concepteur qui renvoi la faute aux occupants pour expliquer les dérives de consommation. En effet, il est important de se rappeler que les bâtiments sont construits pour les occupants et que donc le processus de conception doit placer l'usager et son confort au centre des projets. En d'autres termes ce n'est pas aux occupants de s'adapter aux choix de conception des acteurs de la construction, mais plutôt aux concepteurs de réaliser des choix qui associent performance et confort.

2.3.1 Paramètres influant le comportement

Dans le contexte du bâtiment et principalement celui du logement les leviers d'actions des occupants sur l'environnement sont nombreux tout comme les paramètres influant le comportement des occupants vis à vis de l'énergie. Cette complexe relation entre les occupants et leur environnement est présentée schématiquement dans la Figure 2.2. Ce schéma traduit en français à partir de l'annexe 53 [3] de l'Agence Internationale de l'Energie, présente l'occupant au centre d'un environnement spécifique à un instant donné, qu'il perçoit différemment selon sa catégorie sociale et son état biologique et psychologique. De plus on note deux grands types de paramètres influant le comportement face à l'énergie. D'un coté les paramètres internes (biologique, psychologique et social) qui concernent uniquement les occupants et de l'autre les paramètres liés au bâtiment et aux conditions environnementales. Les actions réalisées dans le bâtiment dépendent alors des paramètres biologiques, psychologiques et sociales des occupants, mais aussi du moment de la journée et de l'environnement du bâtiment. Ce schéma rend alors compte du nombre de paramètres influents le comportement des occupants vis à vis des consommations énergétiques, d'autant plus que les bâtiments sont bien souvent habités par plusieurs individus.

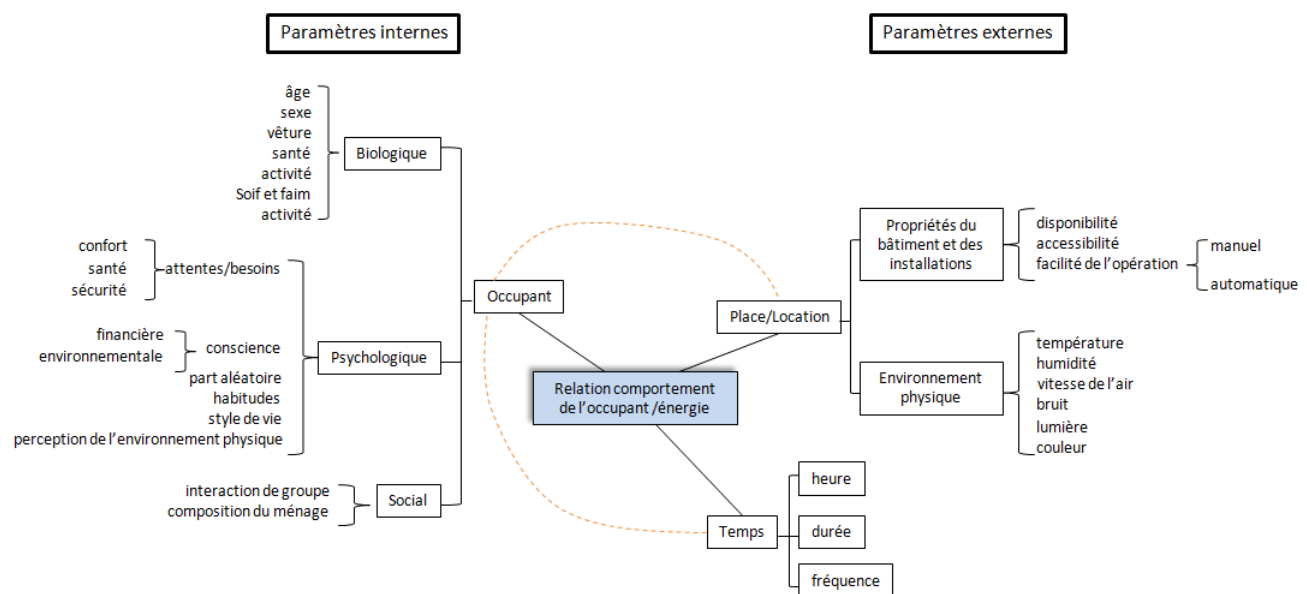


FIGURE 2.2 – Relation entre le comportement des occupants et les consommations d'énergie

2.3.2 Part aléatoire du comportement

En plus de ces liens plutôt rationnels entre l'environnement du bâtiment et les actions des occupants, il y a tout de même quelque chose d'insaisissable dans l'humain. Cela explique que la modélisation du facteur humain doit être modulé par une part aléatoire qu'il est difficile de quantifier mais qui ne doit plus être négligée.

Les travaux canadien d'O'Brien et Gunay [24] sur les actions des occupants sont inspirés de ceux de Leaman [25] et ont été présentés à l'Annexe 66 : Definition and Simulation of Occupant Behaviour. Ils ont fait le point sur des actions parfois surprenantes dans le bâtiment et déclarent que l'occupant :

- agit à des évènements externes aléatoires
- prend des décisions sur les systèmes de contrôles seulement après qu'un événement l'ait incité à le faire
- attend souvent un certain temps avant de s'adapter lorsqu'il est dans une zone d'inconfort
- compense en excès ses actions à des inconforts mineurs
- opère les contrôles ou les systèmes qui sont les plus pratiques plutôt que les plus appropriés
- prend l'option la plus facile et la plus rapide pour un effet immédiat plutôt que la meilleure
- laisse consciemment ou non les systèmes dans leur état après un changement plutôt que de les réinitialiser après que l'inconfort soit passé

A chacun de ces points il est facile de s'identifier et de trouver des exemples qui les illustrent. Néanmoins, ces comportements rendent compte de la difficulté d'un exercice de modélisation. Aussi, ce listing montre que le mécanisme d'action est grandement dicté par le confort des occupants.

2.3.3 Accessibilité aux systèmes

Plusieurs études ont montrées que lorsque l'on s'intéresse aux actions des occupants dans le bâtiment l'accessibilité aux systèmes de contrôle modifiait les comportements. Sutter et al. [26] ont étudiés l'utilisation des stores dans les bureaux en fonction de leur accessibilité. Ils en ont conclu que les stores électriques (accessibles à distance) des bureaux étaient trois fois plus utilisés que les stores manuels. Andersen [27] confirme que l'accessibilité des systèmes de contrôle joue un rôle majeur dans le comportement des usagers et affirme que le temps avant de s'adapter à une zone d'inconfort diminue lorsque les moyens d'adaptation sont nombreux et disponibles. Cette disponibilité des contrôles sur le confort visuel ou thermique modifie alors les comportements adaptatifs des usagers et a en conséquence un impact direct sur le bilan énergétique.

2.3.4 Impact des interactions sociales

La modélisation du comportement des usagers dans un bâtiment ne peut pas se résumer à leurs seules actions. Une réflexion plus large sur l'impact que les interactions sociales ont sur les actions des occupants est menée dans cette partie.

Dans les logements, les usagers interagissent entre eux de telle sorte qu'on ne peut pas considérer le ménage comme une entité unique. La consommation d'énergie est prise dans les rapports de pouvoir quand elle met en jeu la répartition du travail domestique dans le couple ou l'exercice de l'autorité parentale : conflit sur la température de chauffage ou la durée de la douche. Les pratiques liées à l'énergie alimentent un processus de différenciation identitaire entre les membres de la famille : l'un est toujours plus frileux ou économe que l'autre. On peut également observer une spécialisation par le genre entre le côté masculin qui prend plus souvent en charge la maintenance et la décision d'achat, et le côté féminin qui se centre sur l'usage quotidien. Enfin, la présence d'invités au domicile est un moment de surconsommation avec des rituels d'accueil (mise en fonctionnement d'appareils de cuisine, augmentation de la température, augmentation de l'intensité lumineuse, musique, etc.)

calqués aux normes sociales mais qui participent également à une certaine mise en scène de l'identité familiale.

Comme dans les logements, les bâtiments tertiaires, sont exposés au comportement des occupants. Cependant, les leviers d'actions pour agir sur le bâtiment sont moins nombreux que dans le résidentiel, notamment car de nombreux paramètres sont régulés automatiquement par les systèmes. Néanmoins, le nombre d'occupants y est généralement plus élevé et donc les interactions plus nombreuses. Une étude ou une réflexion sur la manière dont les interactions se réalisent permet de savoir si le choix d'un membre prévaut sur celui des autres, un enseignant face à ses élèves, ou si les membres trouvent un compromis dans le choix, comme des collègues dans un bureau ouvert.

OOOOO Études qui donne des tendances sur les interactions sociales à trouver et insérer ici !

2.3.5 Interactions collatérales

Nous venons de voir que la modélisation du comportement des occupants est un exercice complexe car dépendant de nombreux paramètres (temporels, spatiaux, biologiques, psychologiques et sociaux) et dictée par les aléas de la part humaine. Le terme interactions collatérales signifie que lorsqu'une action est réalisée celle-ci se manifeste sous plusieurs effets. L'objectif n'est pas de réaliser un listing des interactions de chaque actions mais de prendre conscience de la complexité de l'exercice. Un simple exemple illustrant le phénomène est celui de l'action d'allumer une lampe qui a deux effets : le premier volontaire servant à ajuster la luminosité et le second collatéral qui réchauffe la zone par les apports internes. En ce basant sur cette réflexion, un modèle qui prédit qu'un individu a froid peut alors lui faire allumer le four ou la lumière pour atteindre sa zone confortable, ce qui relève de l'absurde.

2.4 Influence des systèmes et de leur maintenance

Ce chapitre s'intéresse à la maintenance des systèmes des bâtiments et aux systèmes eux même. En prémisses, on peut rappeler la différence entre besoins et consommations énergétiques. Les besoins correspondent à ce qui est nécessaire de fournir aux bâtiments pour qu'ils atteignent le niveau de confort exigé. Alors que les consommations d'énergie sont égales aux besoins plus les pertes de rendement des systèmes et de distribution. Lors d'une approche de modélisation bottom-up, ou dite de synthèse, comme une simulation thermique dynamique, prédire les consommations énergétiques demande de connaître d'une part les besoins mais également les propriétés des systèmes. Une bonne efficacité des systèmes est alors essentielle pour réduire les consommations, tout comme une bonne connaissance des rendements est essentielle pour prédire les consommations réelles.

La dégradation des performances des systèmes lors de l'exploitation des bâtiments est alors à considérer pour éviter les dérives de consommations et maîtriser les estimations. Cette dégradation liée à l'usage et à la mise en œuvre des composants est étudiée par le projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) MAEVIA, du programme VBD (Villes et Bâtiments Durables). Bien que ce projet soit appliqué à la qualité de l'air intérieur, et non pas énergétique, la simulation du bâtiment dans ses conditions réelles d'utilisation est fondamentale. En effet, la dégradation des systèmes peut impacter de pair la qualité de l'air intérieur et les performances énergétiques. Cette liaison est l'objet d'étude de MAEVIA, qui développe un outil applicable à la QAI pouvant se coupler à un outil de simulation thermique.

Briseperrière [28], sociologue de l'énergie a enquêté sur le rapport entre les équipements et les usagers. Il a alors souligné les difficultés qu'ont les occupants à piloter leurs équipements. Cela, entraîne des utilisations non optimales qui réduisent les performances et donc augmentent les consommations énergétiques. Briseperrière a noté que la gestion de la ventilation est particulièrement mal gérée par les occupants alors que son impact sur les consommations énergétiques est très fort. Ici encore

une mauvaise gestion automatique ou manuelle du renouvellement d'air a un impact significatif sur le confort et les consommations énergétiques. La connaissance des systèmes, de leurs pilotage et de la sensibilisation qu'ont les occupants de ses systèmes sont autant de paramètres à prendre en considération pour l'estimation des consommations énergétiques.

2.5 Influence de la qualité du chantier

En addition aux comportements des usagers et aux réglages des systèmes, la qualité du chantier doit également être remis en question dans le cadre de la maîtrise des performances énergétiques. En effet, en phase de construction il est nécessaire d'être vigilant sur la mise en place des différents éléments. Les professionnels du secteur ont parfois peu de formation sur la mise en œuvre de techniques performantes d'un point de vue énergétique. Les bâtiments performants font appel à des techniques constructives nouvelles, qui ne sont pas toujours parfaitement maîtrisées par les entreprises du bâtiment. Parmi les défauts de construction constatés, il est fréquent d'observer des discontinuités d'isolant, des infiltrations d'air au niveau du réseau électrique et fluide, des pares-vapeur mal installés ou encore des joints d'étanchéité mal posés sur les menuiseries. Cette liste non-exhaustives de défauts de construction est résultante de professionnels pas toujours qualifiés ou appliqués, de désaccords entre les artisans des différents corps d'état ou encore d'une supervision des travaux insuffisante. Ces raisons qui peuvent expliquer une mauvaise qualité du chantier sont à encadrer pour éviter des dérives des consommations. En effet, le suivi continu des étapes du chantier évite que la non-qualité ne se généralise dans le bâtiment.

Pour encadrer l'évaluation de la qualité sur les chantiers et donc répondre aux besoins des conducteurs de travaux et aux maîtres d'œuvre des logiciels rendent possible un contrôle qualité des ouvrages. Ces logiciels disponibles sur tablettes numériques et smart-phones facilitent l'identification des problèmes de qualité tout au long du chantier. Ces applications, telles que FinalCAD⁵ ou Air-Bat⁶ permettent donc d'effectuer les relevés de réserves sur le chantier, puis dans un deuxième temps de contrôler, corriger et générer les procès verbaux. Ce suivi numérique rend alors possible un contrôle qualité exhaustif tout au long du chantier sur la totalité des points clés de l'ouvrage.

Cela peut paraître évident mais le *performance gap* peut être accentué par le manque de vigilance des opérateurs de travaux et des superviseurs de chantier. De même, un chantier de mauvaise qualité implique forcément des surconsommations énergétiques et un confort non assuré pour les occupants.

2.6 De la sociologie à l'ingénierie

La traduction des études sociologiques en informations concrètes pour des ingénieurs d'études ou des chercheurs est une difficulté actuelle majeure tant le nombre de paramètres influençant le comportement des occupants est important. D'ailleurs, de nombreuses études sociologiques disparates ont été menées sur les consommations énergétiques en fonction des paramètres sociaux des occupants, on pense notamment à la thèse de doctorat de Briseperre [28] qui étudie les pratiques des consommations d'énergie dans l'habitat collectif. Ce travail sociologique est basé sur des enquêtes et mesures de terrain, celles-ci permettent d'en tirer des exemples et tendances mais quantifier leur impact est un exercice autrement plus complexe et risqué. Lors de la conférence IBPSA d'Arras⁷ en 2014, Christophe Beslay, sociologue indépendant, indique que le CREDOC⁸ recense une quantité importante de données sur la façon dont vivent les habitants d'un point de vu social mais également

5. Site internet : <http://www.finalcad.fr/>

6. Site internet : <http://www.air-bat.fr/>

7. IBPSA : International Building Performance Simulation Association, site internet : <http://conference2014.ibpsa.fr/>

8. CREDOC : Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de vie, site internet : <http://www.credoc.fr/>

énergétique. Cependant Beslay reste conscient que la base de données actuelle n'est pas suffisamment exhaustive, et ne le sera surement jamais, pour être pleinement exploitée par les chercheurs et ingénieurs.

En plus du travail de traduction des données sociologiques en données exploitables par le modèle, le développeur du modèle ne peut pas prendre en considération la totalité des inputs. En effet, le comportement humain étant très complexe, avoir l'ambition de modéliser tous les paramètres d'entrée reviendrait à créer une "usine à gaz" dont il serait difficile de donner un sens. Ainsi, l'Annexe 53 [3], dont l'objectif était d'enquêter sur le rôle du comportement des occupants sur l'utilisation d'énergie dans les bâtiments a standardisé l'importance des paramètres d'entrée sur les comportements des occupants. La Figure 2.3 présente les niveaux d'importance des paramètres influençant les comportements, alors que la Figure 2.4 est une application pour les comportements vis à vis du chauffage. Il faut lire la Figure 2.4 comme : la température de consigne dépend fortement du niveau d'isolation du bâtiment, alors que la durée du chauffage dépend très peu des intentions du gouvernement. Les références entre crochets correspondent à celles du rapport technique *Occupant behaviour and modeling*, et non pas à cette présente thèse. D'autres tableaux récapitulatifs sont disponibles pour le refroidissement, la ventilation/opérations sur les fenêtres, l'utilisation de l'eau chaude sanitaire, l'usage d'électricité et d'éclairage.

<i>Importance</i>	
<i>Description</i>	<i>Symbol</i>
<i>Very highly significant ($p \leq 0.001$)</i>	***
<i>Highly significant ($p \leq 0.01$)</i>	**
<i>Moderately significant ($p \leq 0.05$)</i>	*
<i>Lowly significant ($p \leq 0.1$)</i>	,
<i>Not significant</i>	<i>n.s.</i>
<i>Not stated</i>	<i>x</i>

FIGURE 2.3 – Notation utilisée pour l'importance des paramètres influents ; la valeur p correspond au niveau statistique



2.7 Synthèse

Le doute sur la représentativité des modèles doit se poser et la citation de Baudrillard : "La simulation précède le réel" sans que "le simulacre remplace l'original" résume bien l'état d'esprit. En partant du constat que les performances énergétiques mesurées sont souvent éloignées de la théorie, nous avons dans ce chapitre évoqué les facteurs pouvant expliquer ces écarts. Le comportement des occupants est identifié comme un paramètre essentiel mais aujourd'hui mal pris en compte dans la modélisation. En effet, les méthodes de simulations actuelles utilisent souvent des scénarios hebdomadaires répétitifs pour simuler l'action des usagers sur le bâti. La prise en compte des apports internes, les positions des protections solaires, la régulation des aérations sont des exemples décorrélés de la notion de confort. Une nouvelle approche doit permettre de développer un modèle, dans lequel les utilisateurs ne sont plus aussi prévisibles et passifs, mais interagissent entre eux et sur leur milieu, modifiant certains paramètres de la simulation en fonction de leurs besoins et activités réelles. Ainsi, les phénomènes d'actions et réactions entre les utilisateurs et leur environnement, pourront mieux être intégrés aux simulations numériques.

La prise en compte de ces phénomènes permettra entre autres de ne plus obtenir comme résultat d'une étude une consommation énergétique absolue, mais plutôt une fourchette basse et haute permettant de connaître la sensibilité du bâtiment à une utilisation plus ou moins vertueuse de celui-ci.

	biological	psychological	social	time	physical environment	building/equipment properties
Temperature Set Point	Gender [2]	Expectations [19]	Ownership (owning/coop/renting) [19]	Time of day [2]	Exterior air temperature [3]	Building insulation level [29]
	Clothing [2,19]	Interaction frequency with heating controls [2]			Outdoor air humidity [2]	Ventilation type [19]
		Window opening [2]				
Heating Duration	Clothing [2,19]	Understanding how controls function [2, 19,25]	Ownership (owning/coop/renting) [2]		Exterior air temperature [2]	Building insulation level [29]
					Outdoor air humidity [2]	Heating system type [2]
		Window opening [2]	Government interventions [29]		Wind speed [2]	Level of control [2]
# of Rooms Heated		Interaction frequency with heating controls [2]				Level of control [2]
Which Rooms are Heated	Gender [2]					Level of control [2]

FIGURE 2.4 – Valeur des paramètres d'influences sur le chauffage de l'espace selon la littérature

Chapitre 3

Modélisation du comportement des usagers

La démarche de modélisation est une approche scientifique qui a pour but de produire de la connaissance sur des phénomènes naturels ou artificiels. Cette démarche est utilisée pour comprendre, prédire voire contrôler des phénomènes qu'ils soient déjà existants ou encore au stade de la conception. Le principe est de créer une simplification numérique du phénomène étudié. Les modèles sont donc souvent indispensables, mais ils sont également toujours faux. Les bons modèles sont des approximations qui apportent une plus-value pour la prévision de phénomènes.

Cette thèse s'intéresse à la modélisation du comportement des occupants pour la prédiction de la demande d'énergie. Pour cela, il est nécessaire de s'intéresser à l'interaction entre les occupants et leur environnement. Ces interactions sont de deux natures : la première concerne les gains dus aux apports métaboliques et les divers apports internes de chaleur ; la seconde concerne l'utilisation des systèmes de l'environnement (fenêtres, volets, lumières, air conditionnée, etc.) qui sont régulés par les occupants et leurs besoins.

Ce chapitre présente les types de modélisation du comportement des occupants recensés dans la littérature et les plateformes numériques pouvant réaliser ces modélisations.

3.1 Types de modèles

Dans ce cadre, nous avons réalisé une étude bibliographique qui nous a permis de distinguer six grandes familles de modélisation du comportement des usagers à des fins énergétiques dans le contexte du bâtiment. Cette large revue des modèles existants est indispensable pour en comprendre les possibilités, forces et faiblesses de chacun afin de répondre aux objectifs initiaux. Les modèles dits : psychologiques, basés sur des valeurs moyennes, déterministes, probabilistes, utilisant les systèmes multi-agents et "action-based" sont présentés dans ce qui suit.

3.1.1 Modèles psychologiques

Les modèles psychologiques du comportement des occupants peuvent être distingués en deux groupes, ceux considérant le comportement individuellement et ceux en lien avec l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments.

En effet, certains modèles psychologiques fonctionnent en utilisant comme indicateurs les besoins fondamentaux des êtres humains. Ces derniers se limitent d'une part aux besoins physiologiques des êtres humains : faim, soif, sexualité, respiration, sommeil, élimination selon la pyramide établie par le psychologue Maslow [29]. D'autre part à la notion de confort physiologique qui considère

les aspects hygrothermiques, acoustiques, visuels et olfactifs. Dans un cadre de modélisation du comportement des usagers à des fins énergétiques, il va de soi que l'intégralité de ces besoins et types de confort ne sont pas pris en compte. Une fois les définitions des paramètres d'influences sélectionnés, l'objectif est de prédire les pratiques¹ des usagers en fonction de la physiologie de la population et des normes sociales. En 1991, le psychologue social, Ajzen [30], a mis au point une théorie du comportement planifié de ce type, qui s'est révélée comme étant à l'origine de nombreux sous-modèles psychologiques. On y retrouve ces sous-modèles sous forme de boucles, généralement considérant connaissance, désir, capacité, attitude et finalement action. Ce terme de boucle est utilisé dans le sens où le modèle se présente comme un enchaînement d'étapes qui sont répétées à chaque pas de temps de la simulation, comme un algorithme.

On a vu que certains modèles psychologiques sont uniquement basés sur la physiologie des occupants, alors que ce paragraphe consacré au deuxième type de modèles psychologiques, intègre la dimension économique. On retrouve une application dans le secteur résidentiel avec Van Raaij et al. [31] qui prennent soin de considérer le ménage lui-même, c'est à dire son niveau socio-démographique, son style de vie, le prix de l'énergie ou encore sa responsabilité devant l'énergie. En comparaison, aux modèles uniquement basés sur la physiologie, ces modèles se revendiquent comme plus complets car ils considèrent en outre la technologie, l'économie, la démographie, les institutions, la culture. Néanmoins, le principe de boucle n'est pas modifié et l'indicateur principal reste le bien être des occupants. Ici l'approche est plus transversale car elle n'est pas centrée uniquement sur la physiologie de l'occupant et son bien être mais considère également des paramètres qui influent effectivement sur le comportement.

3.1.2 Valeurs moyennes

Les modèles fondés sur des valeurs moyennes sont généralement considérés comme élémentaires par la communauté scientifique car leur flexibilité est très réduite. En effet, pour les différentes entrées du modèle on a des valeurs uniques. C'est donc sur ce principe que se base ce type de modélisation, si l'on cherche à étudier la sortie y d'un phénomène, les entrées x_1, x_2, \dots et x_n sont des valeurs statiques, constantes au cours de la simulation. A titre d'exemple, Morel et Gnansounou de l'Ecole Polytechnique de Lausanne [32] considèrent les gains internes des bâtiments résidentiels égaux à $5W/m^2$. Ici la valeur importe peu, elle est d'ailleurs peut être proche de la réalité, mais sa limite réside dans l'impossibilité de la détailler selon des paramètres d'influence : type de pièce, nombre d'occupant, date et heure, etc. Cet exemple parmi tant d'autres permet de dire qu'un modèle basé sur des valeurs moyennes utilise des données totales comme paramètres d'entrée. Ces types de modèles fonctionnent alors sur l'implémentation de valeurs uniques dans l'algorithme de simulation, par conséquent, il en résulte automatiquement des valeurs également uniques pour chaque sortie.

L'application des modèles basés sur les valeurs moyennes est la plus appropriée pour estimer des consommations énergétiques d'un échantillon large de bâtiments. Comme nous le verront dans les prochains paragraphes et alors qu'elle est également envisageable pour des bâtiments individuels, des modèles stochastiques ou à base d'agents produiront des résultats moins brut, plus proche des pratiques possibles et seront donc plus appropriés à un niveau de modélisation supérieur.

3.1.3 Modèles déterministes

Les modèles déterministes ont pour habitude d'être assimilés aux modèles des valeurs moyennes, dans le sens où leurs données d'entrée sont discutables car souvent basées des simplifications. Ces suppositions sont le fruit d'études sociologiques quantitatives trop peu nombreuses pour avoir une

1. En langue française on utilise comme synonyme "pratique" et "comportement" alors que la langue anglaise fait une distinction sémantique. "Behavior" désigne un geste observable et quantifiable, alors que "practice" renvoie à l'activité et permet d'insister sur son contexte de réalisation comme sur le sens que les individus lui attribuent

base de données suffisamment importante et fiable. Certaines données sont disparates et fiables mais tout de même à exploiter avec précaution, tant les paramètres d'influence sont nombreux.

Dans leur modèle, Glicksman et Taub [33] cherchent à identifier les paramètres qui ont la plus grande influence sur l'efficacité énergétique. Dans cet article, la modélisation du comportement des habitants face au chauffage, à la ventilation et à l'air conditionné est faite de manière déterministe. Ce type de modèle simplifié et limité par son dynamisme est également utilisé dans l'outil de simulation thermique dynamique développé par Izuba, Pleiades+Comfie. Dans celui-ci, son cœur de calcul est pour l'utilisateur une boîte noire, qui est seulement maître des données d'entrée. Après avoir renseigné le logiciel sur les éléments géométriques, environnementaux et les différents systèmes du bâtiment, le modélisateur doit définir de multiples scénarii d'utilisation. Pour chaque zone thermique, il doit déterminer : les consignes de température, les scénarios d'occupations, les puissances dissipées, les jeux d'occultation, les niveaux d'éclairage ou encore les besoins en eau chaude sanitaire. Cette détermination est réalisée heure par heure au travers de scénarios hebdomadaires répétitifs totalement décorrélés de la notion de confort. Or, on comprend la limite de considérer les comportements des usagers comme entièrement prévisibles et répétables.

3.1.4 Modèles probabilistes

Les processus probabilistes, également appelés stochastiques, utilisent des paramètres et équations qui évaluent les probabilités d'une action ou d'un changement d'état du système. Contrairement aux modèles basés sur des moyennes ou aux modèles déterministes, les modèles probabilistes se basent davantage sur des études statistiques qui proposent des profils. Les méthodes d'échantillonnage de distributions d'événements sont nombreuses. On retrouve fréquemment des méthodes de la transformée inverse, tel que dans le travail de Vorger sur l'influence des occupants sur la performance énergétique par le biais d'une modélisation stochastique globale [6] ou des méthodes de Monte-Carlo par chaînes de Markov, comme Tijani l'a fait pour le développement d'un modèle purement statistique [34] afin de le comparer aux systèmes multi-agents qui sont eux présentés dans la Section 3.1.6. Dans le cadre de la modélisation du comportement, l'approche probabiliste permet de considérer les aléas comportementaux des humains. Cette approche demande de posséder une base de données suffisante pour connaître les habitudes des occupants, d'où l'intérêt de campagnes de mesures et de questionnaires. Ces informations sur les habitudes des occupants concernent les tâches qui sont réalisées, leurs durées et leurs enchaînements. Les chaînes de Markov sont alors le système mathématique qui correspond le mieux à ce besoin. En effet, les processus de Markov sont "sans mémoire" et permettent des transitions d'états pour des durées plus ou moins longues. Ils permettent ainsi de réaliser aléatoirement des changements d'états (positions, actions, activités, etc.) des occupants du modèle en intégrant préalablement les études statistiques. Concrètement, les chaînes de Markov de premier degré fonctionnent de la manière suivante :

1. Étude des données temporelles d'activité, les probabilités cumulées de transition sont calculées
2. La matrice de probabilité de transition est calculée
3. Un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 est généré
4. Le nouvel état est déterminé, en fonction de l'état précédent, du nombre aléatoire généré et des probabilités cumulées de transition

Un modèle probabiliste avancé est développé dans le volume II : "Occupant behavior and modeling" de l'Annexe 53 : Total energy use in buildings" [3], celui-ci présente une étude statistique préalable sur les consommations énergétiques, détermine la typologie du bâtiment et détermine les informations sur les occupants afin d'en sortir les localisations et activités de chaque occupant pour un pas de temps de 5 minutes. On notera tout de même que les sorties de ce modèle se limitent ici à la localisation et aux activités des occupants, alors qu'on peut imaginer que la finalité d'un tel modèle sera d'estimer les besoins énergétiques. Les modèles probabilistes et les méthodes de type aléatoires permettent de générer des événements ou échantillons extrêmes, tout en ayant conscience

de la pondération des résultats. En effet, c'est le principe de la Gaussienne, il est plus probable de générer un événement dans la moyenne qu'un événement extrême. En revanche, sur de nombreuses simulations les chaînes de Markov ressemblent à des modèles basés sur des valeurs moyennes, car les moyennes des événements aléatoires vont tendre vers les états les plus fréquents trouvés lors de l'étude statistique [3].

Pour synthétiser ce qu'est la modélisation stochastique on dit souvent qu'elle égale à une modélisation déterministe associée à une part d'aléatoire.

3.1.5 "Action-based" modèles

Les modèles axés sur les actions des occupants sont développés suivant deux volets : l'occupation des zones et les activités de leurs occupants. Dans ce type de modèle l'occupation est déterminée par la localisation des occupants qui est le résultat des mouvements d'une zone du bâtiment à l'autre. Tout comme pour les modèles probabilistes, ces déplacements d'une zone à l'autre sont généralement générés simplement par les méthodes des chaînes de Markov et transitions d'états. Les activités des occupants sont générées aléatoirement et concernent les ouvertures de fenêtres, la gestion des lumières, de l'air conditionné ou encore de l'usage des appareils électroménagers. Ces modèles dits d'actions associent donc les comportements des usagers à des déplacements et à des actions concrètes sur les systèmes du bâtiment.

Comme pour les modèles stochastiques, la typologie des bâtiments, le nombre et les types d'occupants par zone sont renseignés au modèle pour le volet des déplacements des occupants. Cependant, la plus-value réside dans l'ajout d'informations supplémentaires concernant les horaires et durées des séjours et activités dans les zones étudiées [3]. Cette modélisation des déplacements au sein du bâtiment, fixe ou suit l'évolution des systèmes à chaque pas de temps qu'ils soient booléens, discontinus ou continus. Pour les définitions des événements on note généralement six attributs à renseigner au modèle, les temps de début et fin, la localisation, les participants, les indicateurs statistiques et les priorités en cas de conflit.

Comparés aux modèles déterministes où les actions sont prédéfinies et inchangeables, ces types de modèles considèrent le caractère aléatoire par une occupation inégale et asynchrone dans l'espace et le temps. On a une combinaison entre les modèles déterministes et probabilistes. La plus-value de ce modèle réside dans la personnalisation des occupants, même extrêmes, aussi bien dans leurs génération que dans leurs comportements concrets devant les systèmes consommateurs d'énergie. Cependant, les modèles d'actions sont de type réactifs et ne prennent pas en compte les interactions entre les occupants du modèle.

3.1.6 Systèmes Multi-Agents (SMA)

Les SMA permettent d'établir des règles de comportement des usagers à travers de l'utilisation d'agents autonomes dont leur comportement est automatiquement calculé sans suivre des profils préétablis. Les modèles à base d'agents considèrent les occupants comme des entités individuelles capables de prendre des décisions selon leurs règles et expériences en étant interactif entre eux et avec leur environnement. Les SMA fonctionnent grâce aux connaissances de l'IAD (Intelligence Artificielle Distribuée), afin de résoudre un problème global à partir des interactions entre des entités élémentaires appelées agents.

La littérature nous amène à classer les SMA en deux grandes catégories. La première où les SMA sont réactifs et reposent sur des actions prédéfinies et déclenchées automatiquement, tels des stimulus. Les agents réactifs perçoivent leur environnement et agissent sur celui-ci en choisissant parmi des comportements prédéfinis, celui qui est le plus adapté à la situation. La deuxième catégorie de SMA est celle fonctionnant sur des agents cognitifs. Dans cette catégorie les agents possèdent des capacités de raisonnement et de mémorisation. Les agents les plus évolués peuvent même développer

de nouvelles connaissances ou des organisations selon des paramètres sociaux, psychologiques et biologiques mais également en fonction des interactions avec les autres agents.

Dans le cadre de la modélisation des occupants dans le contexte du bâtiment et de la maîtrise de l'énergie, Davidsson et Boman [35] présentent un modèle multi-agents considérant lumière et chauffage. L'énumération suivante présente les relations simplifiées entre les agents et les conditions intérieures :

1. Quand aucun agent est dans la pièce, les conditions par défaut sont maintenues
2. Quand un agent entre dans la pièce, il adapte la température et allume les lumières selon ses préférences
3. Quand plusieurs agents sont dans la pièce, les conditions sont fixées en fonction des préférences des agents présents par délibération

Pour un exemple plus récent Le et al.[36] présentent un modèle causal réactif du comportement des habitants dans le milieu résidentiel. Étant donné la diversité et la variation des besoins des habitants, l'objectif est de développer un nouveau type d'outil de simulation dans le cadre de l'amélioration de la gestion de l'énergie.

Kashif [37] a quand à elle développé sous BRAHMS² des agents cognitifs ayant une perception de leur environnement et une capacité de délibération pour le contrôle et la gestion de l'énergie. Cette approche choisie par Kashif ne permet pas d'avoir des résultats exploitables en terme de consommations énergétiques, mais laisse apercevoir le potentiel des modèles considérant social, perception, cognition et éléments psychologiques. Tijani [34], dans la continuité du travail de Kashif [37], dans son article sur l'approche multi-agents du comportement des occupants avertit que malgré un fort potentiel des SMA, la complexité de BRAHMS rend l'application à l'énergétique des bâtiments et à la qualité de l'air intérieur difficile.

3.1.7 Synthèse des familles de modèles

Le choix du modèle dépend fortement des objectifs de la simulation mais aussi des logiciels choisis ou disponibles. On note que le développement d'un modèle se réalise souvent en couplant plusieurs modèles de base. Dans le tableau 3.1, sont regroupés les six modèles présentés dans ce chapitre, leurs données d'entrée, leur développement, une référence et enfin les limites générales du modèle considéré.

2. BRAHMS est un logiciel développé par la NASA, permettant la simulation et l'analyse du comportement d'agents en fonction du temps

Type de modèle	Données d'entrée	Développement	Exemples et références	Limites
Modèles psychologiques	Besoins physiologiques, niveau de confort, données économiques	Développement d'algorithmes axés autour d'indicateurs physiologiques des usagers	[31] En plus de l'aspect physiologique, l'aspect social est considéré dans ce modèle psychologique pré-curseur	Difficulté de la transcription des données sociales en comportements concrets
Valeurs moyennes	Valeurs moyennes fixes (et écarts types), dépend des besoins du modèle	Approche bottom-up - utilisation des inputs dans le cœur de calcul	[32] Les gains internes sont assimilés à une valeur unique constante	Flexibilité des données d'entrée, non variable dans le temps
Modèles déterministes	Scénarios hebdomadaires et annuels répétitifs	Le modèle est développé selon la littérature ou des hypothèses	[33] Modélisation du comportement des habitants face au chauffage, à la ventilation et à l'air conditionné et étude de sensibilité	Pas de réaction dynamique des occupants
Modèles probabilistes	Profiles d'usages, génération aléatoire de paramètres	Études stochastiques, méthodes des chaînes de Markov de Monte Carlo ou similaires	[6] Méthode de la transformation inverse et de fonctions de distribution de probabilité pour la génération d'un ménage	Pas d'interaction entre les occupants
Modèles "Action-based"	Scénario répétitifs, profils d'usage, génération aléatoire de paramètres	Génération d'actions et de mouvements entre zones selon une approche basée sur les chaînes de Markov	[3] Génération des mouvements entre zones pour la présence des occupants et des activités en fonction du temps	La part de modélisation déterministe est toujours présente. Pas d'interactions entre les occupants
Systèmes Multi-Agents	Forte variété de données : sociale, psychologique, biologique, etc.	Utilisation de logiciels SMA spécialisés (BRAHMS, JADE, MAISON, etc.), complémentarité SMA et logiciel de développement (C++, Java, MATLAB)	Agents réactifs [36] : gestion de l'énergie par un modèle réactif au sein d'une maison Agents cognitifs [37][34] : Étude sur l'ouverture des portes d'un bureau avec BRAHMS	Modélisation et simulation lourde en temps et complexe

TABLE 3.1 – Synthèses des grands groupes de modèles pour la modélisation du comportement des usagers du bâtiment

3.2 Choix de la plateforme SMA

L'étude des modèles du comportement des usagers nous a amené à penser que les Systèmes Multi-Agents sont les plus appropriés pour avoir un modèle fidèle au comportement réel des occupants et ainsi garantir les prédictions des consommations. Une des caractéristiques principale des SMA est qu'ils sont composés d'éléments autonomes et capables d'interagir. Ce chapitre s'intéresse aux plateformes existantes, dans l'objectif de sélectionner la plus appropriée.

3.2.1 BRAHMS

BRAHMS (*Business Redesign Agent-based Holistic Modeling System*) est une plateforme multi-agent pour modéliser le comportement humain. Ces agents ont des besoins, des activités qui leurs sont propres et peuvent communiquer entre eux. BRAHMS est très puissant pour représenter des échanges et des collaborations entre agents mais aussi très gourmand en temps de calculs. La plateforme, codée en Java, permet d'ailleurs le développement d'architecture de type *Belief-Desire and Intension* (BDI). Cette plateforme s'est révélée comme adaptée pour des applications spécifiques car elle peut être très fidèles à la réalité mais devient moins pertinente pour des applications transversales.

Tijani [34], dans la continuité du travail de Kashif [19], a utilisé l'environnement BRAHMS pour étudier les ouvertures de portes dans un bureau et créer un lien avec la qualité de l'air intérieure. Dans ces travaux menés par le G-SCOP (Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production à Grenoble), l'utilisation des agents pour modéliser le comportement des usagers est fidèle à la réalité, néanmoins difficile à appliquer à l'énergétique du bâtiment et à la qualité de l'air.

3.2.2 Repast

Repast (*REcursive Porous Agent Simulation Toolkit*) est une plateforme de modélisation et simulation avancée, gratuite et libre à base d'agents. Il existe deux éditions, *Repast Symphony* développé en Java, interactif et facile à utiliser. Et *Repast HPC (High-Performance Computing)* développé en C++ pour les experts qui utilisent des super-ordinateurs.

Lacroix et al. [38] a présenté ses travaux sur le contrôle des systèmes thermiques dans les bâtiments par gestion multi-agents. Ce projet a pour objectif d'optimiser la gestion de l'énergie en considérant l'impact économique du prix de l'énergie. En plus de gérer la demande d'énergie, la gestion multi-agent au travers de Repast permet d'intégrer les sources d'énergies alternatives. L'architecture se base sur quatre types d'agents : des consommateurs, des producteurs, des distributeurs et des agents environnementaux. Le bâtiment est ici décrit comme un système multi-agent qui gère automatiquement les systèmes de contrôles thermique : chauffage, ventilation, air conditionné, production d'eau chaude sanitaire. Les résultats de cette étude montrent qu'un surcout de 2.5 % entraîne 35 % de confort thermique supplémentaire.

3.2.3 NetLogo

NetLogo est une plateforme open-source SMA de modélisation de phénomènes collectifs. La plateforme est bien adaptée à la modélisation de systèmes complexes composés de centaines d'agents agissants en parallèle. La plateforme offre la possibilité de créer ses propres modèles constitués de trois types d'agents : les "*turtles*" qui se déplacent dans leur environnement, les "*patches*" qui sont une portion statique de l'espace et les "*observers*" qui organisent et donnent des instructions aux autres agents. NetLogo permet des modélisations des sciences sociales et naturelles de manière relativement simple.

Andrews et al. [39] ont utilisé NetLogo pour tester comment les bâtiments réagissent en fonction du comportements des occupants. Le comportement a été illustré sur l'application du confort des

agents à la lumière et à son intensité. La modélisation du comportement des usagers sur la plateforme NetLogo doit pouvoir à terme être intégrée à une maquette numérique de type BIM. En effet, les limites du BIM peuvent être repoussés assez loin et une intégration des activités des occupants est à prévoir.

Bibliographie

- [1] GIEC, “Cinquième rapport du GIEC sur les changements climatiques et leurs évolutions futures,” tech. rep., 2014.
- [2] J. Rifkin, *La troisième révolution industrielle. Les liens qui libèrent*, 2012.
- [3] H. Polinder, M. Schweiker, A. Van Der Aa, K. Schakib-Ekbatan, V. Fabi, R. Andersen, N. Morishita, C. Wang, S. Corgnati, P. Heiselberg, D. Yan, B. Olesen, T. Bednar, and A. Wagner, *Volume II : Occupant behavior and modeling, Annex 53 : Total energy use in buildings*. IEA/ECBCS, 2013.
- [4] J. H. Kampf and D. Robinson, “A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows,” *Energy and Buildings*, vol. 37, p. 445–453, 2007.
- [5] Q. Darakdjian, B. Lacarrière, and B. Bourges, “Spatial approach of the energy demand modeling at urban scale,” Master’s thesis, Ecole des Mines de Nantes, 2013.
- [6] E. Vorger, P. Schalbart, and B. Peuportier, “Etude de l’influence des occupants sur la performance énergétique des logements par le biais d’une modélisation stochastique globale,” *Conférence IBPSA France-Arras*, 2014.
- [7] B. Michaelson and J. Eiden, “Humancomfort modelica-library thermal comfort in buildings and mobile applications,” *7 eme Conférence Modélica*, 209.
- [8] K. Charles, “Fanger’s thermal comfort and draught models,” tech. rep., Institut de Recherche en Construction, 2003.
- [9] Gaaloul, *Interopérabilité basée sur les standards Modelica et composant logiciel pour la simulation énergétique des systèmes de bâtiment*. PhD thesis, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble, 2012.
- [10] J. Sousa, “Energy simulation software for buildings : Review and comparison.” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.
- [11] J. Chapman, P.-O. Siebers, and D. Robinson, “Coupling multi-agent stochastic simulation of occupants with building simulation,” *Building Simulation and Optimization*, 2014.
- [12] D. Bourgeois, *Detailed occupancy prediction, occupancy-sensing control and advanced behavioural modelling within whole-building energy simulation*. PhD thesis, Université Laval, 2005.
- [13] P. Hoes, J. Hensen, M. Loomans, B. Vries, and D. Bourgeois, “User behavior in whole building simulation,” *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 295–302, 2009.
- [14] M. Bonte, F. Thellier, and B. Lartigue, “Impact of occupant’s actions on building performance and thermal sensation,” *Energy and Buildings*, 2014.
- [15] E. Mills, H. Friedman, T. Powell, N. Bourassa, D. Clardge, T. Haasl, and M. A. Piette, “The cost-effectiveness of commercial-buildings commissioning. a meta-analysis of energy and non-energy impacts in existing buildings and new construction in the united states,” tech. rep., Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.
- [16] L. Norford, R. Socolow, E. Hsieh, and G. Spadaro, “Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a ‘low-energy’ office building : insights from reconciliation based on the doe-2 model,” *Energy and Buildings*, vol. 21, pp. 121–131, 1994.

- [17] IFPEB, “Consommations énergétiques réelles : Comment les prévoir et s’engager?,” tech. rep., 2014.
- [18] P. B. Durable, “Charte pour l’efficacité énergétique des bâtiments tertiaires publics et privés,” tech. rep., •, 2013.
- [19] A. Kashif, S. Ploix, J. Dugdale, and X. Le Binh Hoa, “Simulating the dynamics of occupant behaviour for power management in residential buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 56, pp. 85–93, 2013.
- [20] H. M. Chen, C. W. Lin, S. H. Hsieh, H. F. Chao, C. S. Chen, R. S. Shiu, S. R. Ye, and Y. C. Deng, “Persuasive feedback model for inducing energy conservation behaviors of building users based on interaction with virtual object,” *Energy and buildings*, 2012.
- [21] T. de Meester, A. Marique, A. de Herde, and S. Reiter, “Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of europe,” *Energy and Buildings*, vol. 57, pp. 313–323, 2013.
- [22] L. Degelman, “A model for simulation of daylighting and occupancy sensors as an energy control strategy for office buildings,” *Energy and Buildings*, 1999.
- [23] T. S. Larsen, H. Knudsen, A. M. Kanstrup, E. Christiansen, K. Gram-Hanssen, M. Mosgaard, H. Brohus, P. Heiselberg, and J. Rose, “Occupants influence on the energy consumption of danish domestic buildings,” tech. rep., Aalborg University, 2010.
- [24] W. O’Brien and B. Gunay, “The contextual factors contributing to occupants’ adaptive comfort behaviors in offices e a review and proposed modeling framework,” *Building and Environment*, vol. 77, pp. 77–87, 2014.
- [25] A. Leaman, “Window seat or aisle?,” *Architects’ Journal*, 1999.
- [26] Y. Sutter, D. Dumortier, and M. Fontoynt, “The use of shading systems in vdu task offices : A pilot study,” *Energy and Building*, vol. 38, pp. 780–789, 2006.
- [27] R. V. Andersen, *Occupant behaviour with regard to control of the indoor environment*. PhD thesis, Technical University of Denmark, 2009.
- [28] G. Briseperrière, *Les conditions sociales et organisationnelles du changement des pratiques de consommation d’énergie dans l’habitat collectif*. PhD thesis, Université Paris Descartes, 2011.
- [29] A. Maslow, *Devenir le meilleur de soi-même : Besoins fondamentaux, motivation et personnalité*. Eyrolles, 1956.
- [30] I. Ajzen, “The theory of planned behavior,” *Organizational behavior and human decision processes*, vol. 50, pp. 179–211, 1991.
- [31] W. F. Van Raaij and T. Verhallen, “A behavioral model of residential energy use,” *Journal of Economic Psychology*, vol. 3, pp. 39–63, 1983.
- [32] N. Morel and E. Gnansounou, “Énergétique des bâtiments,” tech. rep., Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009.
- [33] L. Glicksman and S. Taub, “Thermal and behavioral modeling of occupant-controlled heating, ventilating and air conditioning systems,” *Energy and Buildings*, vol. 25, pp. 243–249, 1997.
- [34] K. Tijani, A. Kashif, Q. Dung Ngo, S. Ploix, B. Haas, and J. Dugdale, “Comparison between purely statistical and multi-agent based approaches for occupant behaviour modeling in buildings,” *Conférence IBPSA France-Arras*, 2014.
- [35] P. Davidsson and M. Boman, “Distributed monitoring and control of oce buildings by embedded agents,” *Inforamtion sciences*, vol. 171, pp. 293–307, 2005.
- [36] X. H. B. Le, A. Kashif, S. Ploix, J. Dugdale, M. Di Mascolo, and S. Abras, “Simulating inhabitant behaviour to manage energy at home,” *Conférence IBPSA*, 2010.
- [37] A. Kashif, X. Le Binh Hoa, J. Dugdale, and S. Ploix, “Agent based framework to simulate inhabitant’s behaviour in domestic settings for energy management,” *Conférence IBPSA*, 2011.

- [38] B. Lacroix, C. Paulus, and D. Mercier, “Multi-agent control of thermal systems in buildings,” *Agent Technologies for Energy Systems*, 2012.
- [39] C. Andrew, D. Yi, U. Krogmann, J. Senick, and R. Wener, “Designing buildings for real occupants : An agent-based approach,” *IEEE*, vol. 41, 2011.