

Introduction générale

Chapitre 0

Chapitre 0

Chapitre 0

1

Modélisation et visualisation à l'interface entre les disciplines

Version **2019-10-22**

- 10/10/2019 : Nouveau plan
- 22/10/2019 : fin écriture + relecture + rendu Lena
- 11/11/2019 : début reprises Lena
- 12/11/2019 : reprises 1.1 et 1.2
- 13/11/2019 : reprises 1.3

Introduction

À faire après retour Lena

1.1 D'où je viens

Le travail de recherche présenté dans cette thèse s'inscrit profondément à l'interface entre plusieurs courants disciplinaires liés à l'étude des phénomènes sociaux dans l'espace. Pour en comprendre aussi bien le questionnement que l'approche mobilisée et les résultats obtenus, il me¹ paraît important de faire un rapide retour sur ma formation initiale et début de parcours dans le monde de la recherche académique, qui explique et préfigure assez largement le positionnement adopté dans ce travail. Depuis une formation classique de géographie humaine et urbaine jusqu'à l'exercice de fonctions d'ingénieur d'étude en modélisation, en passant par une spécialisation en géomatique et cartographie, chacune des étapes de ma formation permet de mieux appréhender et comprendre l'aboutissement à cette thèse basée sur la co-construction interdisciplinaire de modèles spatiaux et sur leur exploration graphique.

1.1.1 Géographie

Ce travail de recherche s'inscrit avant tout, tant administrativement que conceptuellement, dans le champ disciplinaire de la géographie. Cette discipline, consacrée à l'étude de la dimensions spatiale de phénomènes sociaux, constitue les fondements de ma formation initiale. En sortant de classes préparatoires littéraires généralistes, j'avais ainsi été frappé par l'exercice du commentaire de cartes, à visée tant verticale (cartes géologiques) qu'horizontale (cartes topographiques). On pouvait décrire et expliquer le fonctionnement économique et social d'un lieu par la seule observation de ses structures et des contextes spatiaux dans lesquels il s'inscrit.

Géographie urbaine. Cela m'a mené vers un cursus universitaire classique de géographie, majoritairement marqué par la géographie humaine et la recherche de grandes tendances spatiales dans les interactions sociales humaines. Avec un intérêt pour l'aménagement et l'urbanisme, la géographie urbaine, dans sa dimension sociale, m'est rapidement apparue comme particulièrement stimulante dans sa capacité à décrypter, à expliquer et à comparer des processus sociaux variés à l'échelle intra-urbaine. Il ne s'agissait plus simplement de décrire un état, mais d'expliquer les processus spatiaux et sociaux y ayant mené. Au regard des enseignements d'urbanisme et de politiques de la ville, ces approches permettaient ainsi de comparer le résultat de différentes politiques publiques, et de mener un début de mesure objective de l'écart entre leur objectif exprimé et leur action effective.

1. Dans ce chapitre, très personnel et consacré essentiellement à la description et justification d'un positionnement individuel, le choix de la première personne du singulier me semble tout à fait adapté. Dans le reste de ce manuscrit, qui relate une expérience collective, la première personne du pluriel sera exclusivement mobilisée.

En master, j’ai voulu appliquer ces approches en initiant, sous la co-direction de Renaud Le Goix et Antonine Ribardiére, un mémoire sur la comparaison de l’intégration spatiale des migrants entre les politiques francophones et anglophones. Les politiques migratoires francophones, nourries du modèle jacobin français, menaient-elles à une plus forte inclusion et mixité sociale que les modèles anglophones, fondés sur l’image d’un « *salad-bowl* » communautaire ? Le cas d’étude choisi portait sur le Canada, pays ayant l’avantage de présenter ces deux communautés linguistiques et culturelles – francophones jacobines et anglophones communautaires –, et d’avoir une forte culture – et attractivité – migratoire, aussi bien pour les pays les plus développés que pour les Suds. Le recensement canadien, enfin, permettait les études ethniques et communautaires en offrant des statistiques ethniques rares dans les autres pays.

Géographie Théorique et Quantitative. Dans un contexte de découverte de l’analyse spatiale, de la modélisation graphique, des systèmes d’information géographiques (SIG) et d’approches plus systémiques et horizontales de description et d’explication de phénomènes socio-spatiaux, ce travail de Master s’est assez rapidement orienté vers une démarche quantitative et à visée plus généralisante. Le mémoire qui en a résulté, intitulé « Ségrégation spatiale et origines ethniques dans les métropoles canadiennes », consiste alors en un tournant vers la géographie théorique et quantitative (GTQ). L’approche se veut très quantifiée, et fait la part belle à la comparaison des différents indices de ségrégation caractérisant les distributions spatiales de la population urbaine canadienne. Pour être en mesure de mener cette comparaison de manière systématique, une auto-formation poussée avait été nécessaire, notamment sur les techniques d’analyse de données, de réduction de dimensionnalité (les recensements canadiens contiennent des centaines de catégorie qui ne pouvaient toutes être traitées individuellement) et sur une première approche d’automatisation de traitements (via SAS). Il fallait être en mesure de tester rapidement différentes hypothèses sur les quelques milliers de « secteurs de recensement » impliqués dans l’étude.

Du point de vue méthodologique, cette première expérience d’exploration systématique d’un jeu de données m’avait montré la nécessité de parvenir à une certaine automatisation de la chaîne de traitement, depuis la sélection des données, le calcul de tel ou tel indice, jusqu’à leur représentation (carto)graphique. Les données analysées étaient en effet hétérogènes, multidimensionnelles, et je cherchais à les caractériser par le calcul d’une dizaines d’indices de ségrégation, globaux et locaux. Les quelques macros SAS mises en place ne permettaient alors pas une automatisation totale de cette démarche d’analyse, et les mois d’été passés aux traitements systématiques et répétitifs nécessaires à une approche comparative ne rendaient que plus criant le besoin d’une méthode intégrée et automatisée.

1.1.2 Géomatique

C’est donc à la recherche de ces éléments que je me suis orienté, pour le master 2, vers une spécialisation en géomatique et cartographie, en inté-

grant le master professionnel Carthagéo. Les connaissances, méthodologiques et techniques, que j'y ai acquis sont nombreuses et ont toutes concouru aux démarches mises en place dans ce travail de thèse.

Programmation, automatisation et interfaces graphiques. En premier lieu, Carthagéo m'a permis de découvrir des méthodes d'automatisation de chaînes de traitement de données spatiales. Avec l'initiation à la programmation, il devenait important d'acquérir une vision algorithmique, systématique et processuelle des analyses que je menais jusque là de manière manuelle et répétitive. Par exemple, les successions de calculs de CAH menés sur les données canadiennes, réalisées pour chaque métropole, pour chaque origine ethnique, et à plusieurs niveaux d'agrégation spatiale, pouvaient être automatisés une fois la démarche précisément explicitée. En préalable à l'automatisation d'une démarche, il fallait avant tout pouvoir la formaliser, sur papier d'abord, de manière à pouvoir en réaliser une implémentation informatique dans un second temps. C'est, pour moi, la découverte de la conception de modèles graphiques, non plus dédiés à la description d'un lieu comme dans la chorématique que j'avais découverte les années précédentes, mais à l'explicitation d'un processus d'analyse. Avec l'automatisation permise par l'implémentation de ces chaînes de traitement, il devenait possible de mener des études systématiques, reproducibles et paramétrables.

Dans le cadre d'un projet de programmation SIG, j'ai aussi dû réaliser un outil – un *plugin SIG* –, permettant une comparaison visuelle et mesurée de la qualité de différents services de géocodage. Ce projet, réalisé au sein de l'École Nationale des Sciences Géographiques, institution gérée par l'Institut Géographique National (IGN²), visait notamment à comparer le géocodage proposé par une société internationale – Google Maps – et par un service public national – l'IGN et la BD TOPO –. En dehors de l'aspect technique, cette première expérience de projet de programmation appliquée a surtout été l'occasion de réfléchir à des questions d'interface homme-machine. Comment rendre intuitif, pour un utilisateur n'ayant pas participé à sa conception, l'usage d'un outil interactif pensé pour vérifier la cohérence de géocodage de différentes adresses tirées de manière aléatoire dans l'espace francilien ? Fallait-il privilégier la présentation de l'indicateur quantitatif – la distance entre les points issus du géocodage – ou plutôt donner une idée plus contextuelle de la localisation spécifique des résultats du géocodage ? Cette sensibilité à l'« usabilité »³ d'un logiciel a été très présente dans la suite, et me paraît fortement visible dans le présent travail de thèse (voir partie 5.4).

Approches géométriques. Une autre approche extrêmement mobilisée dans cette thèse, est la vision processuelle « géométrique » des traitements de données spatiales. Dans ce type d'approches, caractérisées par les recours aux

2. L'IGN a depuis été renommé en « Institut National de l'information géographique et forestière ».

3. L'usabilité est définie selon le standard ISO (2018) comme la combinaison de trois propriétés que sont « l'efficacité » d'une interface (précision et qualité des résultats obtenus en l'employant), son « efficience » (coût temporel et concentration que cela demande à l'utilisateur) et la satisfaction éprouvée par l'utilisateur suite à son usage (ZHENG 2019, p. 39).

opérateurs spatiaux, les agrégations, extractions et filtrages de données sont réalisés de manières surtout spatiales plutôt qu’attributaires. Par exemple, plutôt que de définir des voisinages comme la co-appartenance à une même structure territoriale (les communes d’un département par exemple), on aura plutôt tendance à définir ces voisinages à partir de contiguités spatiales d’ordre n . De la même manière, pour confondre des maillages différents (bureaux de vote et IRIS par exemple), on peut procéder à une agrégation au niveau administratif supérieur (la commune), mais aussi effectuer une intersection géométrique et re-ventiler les populations dans le maillage résultant.

Il s’agit de prendre en compte le contexte spatial, topologique, pour réaliser les opérations sur les données. En somme, cela revient à mobiliser la dimension spatiale des données dans les différentes chaînes de traitement mises en œuvre, et la différencier fortement des autres dimensions, attributaires. Ces approches sont nécessaires à la réalisation d’analyses portant sur des données de différentes granularités, de différents maillages : elles permettent en effet d’homogénéiser des informations dont la dimension spatiale est primordiale. En tant que telle, cette vision « géométrique » nous a été fortement recommandée et transmise dans le cadre d’enseignements d’analyse spatiale.

Dans le modèle présenté dans cette thèse ([chap2](#)), une large partie des mécanismes est caractérisé par des processus géométriques, qu’il s’agisse de la mise en place de zones tampons autour d’agrégats ou de pôles, de prises en compte du voisinage – définition des agrégats –, de logiques de distances euclidiennes – satisfaction de protection dépendant de la distance au château – , d’intersections et unions spatiales – héritage des agrégats – etc. L’influence de mon parcours me semble indéniable sur ces choix de modélisation où l’espace est traité de manière continue, démarche assez peu répandue dans les modèles de dynamiques spatiales.

Représentations (carto)graphiques. Un dernier point lié à mon enseignement de master a largement infusé sur les choix de ce travail de thèse. Le master Carthagéo est une formation en grande partie dédiée à la cartographie, c’est-à-dire à l’apprentissage des « règles » de représentation cartographiques et à une certaine réflexivité sur les différents messages qu’une carte peut convoyer. La réflexion méthodologique sur les usages de la représentation (carto)graphique pour rendre compte d’un jeu de données est fortement présente dans l’ensemble des projets qui doivent être réalisés au cours de l’année de formation. Les choix de représentation graphiques, très présents dans ce travail de thèse, ont ainsi durablement percolé depuis cet apprentissage.

1.1.3 Modélisation : à la confluence de la GTQ et de la géomatique

Master professionnel oblige, la validation de Carthagéo impliquait la réalisation d’un stage de fin d’étude, en entreprise ou en unité de recherche. J’ai eu la chance d’entamer un stage dans l’UMR Géographie-cités, en mai 2011, sous la co-direction de Thomas Louail, Clara Schmitt et Sébastien Rey-Coyrehourcq.

Ce stage, finalement intitulé « Conception de modèles et d’outils de géosimulation » (CURA 2011), était déjà organisé autour de tâches qui résonnent fortement vis-à-vis du contenu de la présente thèse.

Il s’agissait, de « prendre part à toutes les étapes de la modélisation », grâce à :

1. l’enrichissement d’un modèle de simulation (SimpopLocal) ;
2. la participation à la conception et à l’implémentation d’un second modèle de simulation (SimpopNet) ;
3. la création d’un outil de production de rapports de simulations (TrajPop) ;
4. la création d’un outil d’exploration cartographique des résultats de simulation (CURA 2011, p. 12-13).

Ce stage de six mois, et les deux années de contrats d’ingénieur d’étude qui l’ont suivi et ont permis d’en prolonger les recherches (au sein des projets Geo-DiverCity, MIRO² puis TransMonDyn)⁴ ont durablement marqué mon rapport à la modélisation, à l’utilité de ses méthodes et à la manière de construire un modèle de façon collective.

Découverte de la modélisation à base d’agents. Ce stage a marqué ma découverte du domaine de la modélisation, et en particulier de la modélisation à base d’agents. Par coïncidence, le premier modèle que j’ai eu à comprendre et à enrichir était un modèle de simulation de l’émergence et de la hiérarchisation d’un système de peuplement sur le temps long, au néolithique : SimpopLocal (SCHMITT 2014; REY-COYREHOURCQ 2015). Il s’agissait de tester des hypothèses issues de la géographie théorique et quantitative en les éprouvant, *in silico*, à l’aide d’un outil informatique permettant de simuler des dynamiques spatiales.

Pour que je parvienne à comprendre et à m’approprier le modèle, mes encadrants m’avaient demandé d’ajouter un mécanisme exogène de perturbation du système simulé, afin de prendre en compte l’effet d’incidences de catastrophes naturelles. L’idée de mon implication était de me permettre de me former, par la pratique, aux notions sous-jacentes de la modélisation de systèmes complexes : émergence, interactions entre agents, processus endogènes et exogènes etc.

Ces éléments ont été mis en pratique dans la participation à la conception et à l’implémentation d’un second modèle de simulation, « SimpopNet-Réseaux », « modèle-jouet » servant de prototype pour le modèle SimpopNet développé plus tard (SCHMITT 2014). Il s’agissait cette fois-ci de modéliser la co-évolution entre systèmes de villes et réseaux de communication, en simulant des potentiels d’interactions entre villes par l’intermédiaire de réseaux routiers formalisés par des graphes.

Visualisation et évaluation de modèle. Pour rendre compte de ces deux modèles – SimpopLocal et SimpopNet –, il m’avait été demandé de développer

4. Respectivement portés par Denise Pumain (ERC GeoDiverCity), Arnaud Banos (ANR MIRO2) et Lena Sanders (ANR TransMonDyn).

des outils de visualisation et d’exploration de leurs comportements. Les outils de visualisation intégrés à la plateforme de modélisation, NetLogo, n’étaient en effet pas suffisants pour rendre compte des différentes dynamiques produites par ces modèles. Dans un premier temps, pour étudier l’effet des perturbations sur SimpopLocal, j’ai implémenté un type de représentation utilisé pour montrer l’évolution des rangs des villes d’un système, en m’appuyant sur les « rank clocks » de BATTY (2006). Cette visualisation d’une itération à la suivante était très adaptée, mais ne permettait d’évaluer qu’une unique dimension (la stabilité des rangs) des phénomènes modélisés. De plus, il était nécessaire de re-générer manuellement ces graphiques à chaque nouvelle sortie du modèle.

C’est par le biais de la recherche d’automatisation et de proposition de plusieurs modes de représentation que j’ai été amené à découvrir le langage R et ses possibilités de création de rapports automatiquement produits à partir de jeux de données. L’outil qui en a découlé, intitulé TrajPop (analyse des trajectoires de population), a été en premier lieu mobilisé pour catégoriser et représenter les populations simulées de SimpopLocal. Cela marquait ainsi un premier pas vers une évaluation systématique des sorties de simulation, permettant de plus d’archiver de manière systématisée les résultats de simulation. Par la suite, TrajPop a été employé et amélioré pendant plusieurs années pour caractériser l’évolution des populations de systèmes de villes empiriques et non plus simulés (par exemple dans PUMAIN et al. (2015)).

Accompagnement à la modélisation. Un dernier aspect hérité de mes années de stagiaire/ingénieur d’étude à l’UMR Géographie-cités concerne un mode particulier de modélisation, pleinement inscrit dans le travail collectif. Il s’agit d’une approche collective, collaborative voire accompagnatrice de la modélisation. En effet, si les modèles SimpopLocal et SimpopNet étaient pilotés par des doctorants-modélisateurs, j’ai aussi participé à une expérience de modélisation commune où mon rôle, mi-modélisateur mi-accompagnateur, consistait à formaliser et implémenter des hypothèses sur la constitution de réseaux de collaboration scientifique. Marie-Noëlle Comin, géographe qui avait réalisé une thèse empirique sur le sujet (COMIN 2009), cherchait ainsi à tester différents scénarios explicatifs aux regroupements de chercheurs dans le cadre de la constitution de consortiums en vue de candidature à des financements de projets scientifiques : par affinité et historique de collaboration, par importance bibliométrique, par capacité passée à remporter des financements etc.

Le modèle issu de cette co-construction, SearchNet, a été élaboré pendant près de deux ans, en requérant une forte perméabilité de ses concepteurs aux thématiques et usages de l’autre. Par faute de temps consacré à sa finalisation, ce modèle n’a finalement jamais été achevé et mobilisé dans une publication scientifique. Cette expérience, que l’on pourrait qualifier d’avortée, m’a pourtant permis de réaliser que pour mener à terme un projet de modélisation fortement collectif, il était nécessaire de disposer de beaucoup de temps, de motivation, et qu’une partie non négligeable de ces deux ressources rares devait être dédiée à l’apprentissage, des deux côtés, des thématiques et mé-

thodologies mobilisées dans un modèle : le modélisateur devait pleinement s'accoutumer au sujet thématique traité, et le thématicien s'intéresser aux aspects méthodologiques pour être en mesure de comprendre les implications de l'implémentation informatique du modèle.

Ma formation académique et mes expériences passées de modélisation à base d'agent, entre géographie et géomatique, ont considérablement influencé la manière dont le présent travail de recherche a été abordé. Ces éléments n'expliquent pas, à eux seuls, l'ensemble des choix faits dans cette thèse, mais peut-être permettent-ils de mieux les comprendre, qui plus est au regard du contexte dans lequel cette thèse a été conçue et réalisée.

1.2 Contexte d'inscription du travail

Le sujet initial de cette thèse a été conçu alors que j'étais ingénieur d'étude en analyse de données et représentations cartographiques, sous l'encadrement de Lena Sanders, pour le projet ANR TransMonDyn⁵. Ce projet interdisciplinaire, officiellement mené de 2011 à 2014, visait à « modéliser les grandes transitions de l'évolution du peuplement dans l'Ancien et le Nouveau Monde : contraintes environnementales, interactions spatiales et innovations sociales dans la dynamique multi-échelles de systèmes complexes ».

C'est au sein de ce projet que s'est constitué le groupe de travail qui a donné lieu à SimFeodal, et c'est dans TransMonDyn que ce modèle, les hypothèses sur lesquelles il repose et les grandes lignes conceptuelles qui l'animent ont été conçues. Il me paraît donc indispensable de préciser les cadres conceptuels et pratiques de ce projet, et en particulier ceux qui ont servi de base aux grandes directions empruntées dans cette thèse.

1.2.1 Modélisation de processus spatiaux

L'entrée principale de TransMonDyn était résolument spatiale. Le projet cherchait à identifier et à modéliser de grandes transformations dans les systèmes de peuplements. Dans une première phase de travail, la quarantaine de participants initiaux ont identifié douze cas d'études (tableau 1.1) où les systèmes de peuplement avaient été profondément et durablement modifiés dans leur dimension spatiale. Ces cas d'études portaient sur des régions et échelles spatiales variées – d'une micro-région nord-américaine ou française jusqu'au monde entier –, sur des périodes et étendues temporelles variées – de milliers d'années à la préhistoire à un unique siècle) l'époque contemporaine –, mais avaient en commun, comme le descriptif du projet⁶ le mentionne, « un “avant” et un “après” radicalement différents du point de vue de l'occupation de l'espace par les sociétés ».

5. Programme « Blanc » de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), sous le code ANR-10-BLAN-1805, www.transmondyn.parisgeo.cnrs.fr

6. Accessible sur le site de l'ANR - <https://anr.fr/Projet-ANR-10-BLAN-1805>

N°	Titre	Période étudiée	Zone géographique	Porteur(s)
1	Sortie d'Afrique	- 70 000	Monde	J.-M. Hombert, C. Coupé
2	Néolithique Bantu	- 1000 / 1000	Afrique subsaharienne	J.-M. Hombert, C. Coupé
3	Village formation in Pueblo societies	600 / 1300	Sud-Ouest États-unien	T. Kohler
4	Émergence des villes	- 8000 / 2000	Monde	D. Pumain
5	Concentration de l'habitat de l'Âge du Fer	- 600 / - 400	Gaule méridionale	P. Garmy, J.-L. Fiches, L. Nuningger
6	Romanisation	- 200 / 100	Gaule méridionale	M.-J. Ouriachi, F. Bertoncello
7	Antiquité tardive : une transition ?	100 / 600	Gaule méridionale	F. Favory, C. Raynaud
8	800-1100 : polarisation et territorialisation	800 / 1100	Europe du Nord-Ouest	S. Leturcq, E. Lorans, X. Rodier, E. Zadora-Rio
9	Transition urbaine : 18ème - 19ème siècles	1700 / 1900	France	A. Bretagnolle, A. Franc
10	Urbanisation de l'Afrique du Sud	? / 2000	Afrique du Sud	C. Vacchiani-Marcuzzo
11	Littoralisation des systèmes de peuplement	700 / 2010	Monde	C. Ducruet
12	Émergence de métropoles polycentriques "Mega City Regions"	1960 / 2050	Monde	F. Le Néchet

TABLEAU 1.1 – Les 12 cas d'étude, ou « transitions », du projet TransMonDyn - www.transmondyn.parisgeo.cnrs.fr/transitions-etudiees/cas-empiriques

Des processus génériques : la recherche de faits stylisés. L'une des ambitions principales était de parvenir à identifier des grands types génériques de transformations spatiales (concentration, dispersion, sédentarisation, hiérarchisation...). On cherchait à caractériser ces transformations, matérialisations spatiales de processus sociaux, sous forme de « faits stylisés », c'est-à-dire de « présentation[s] simplifiée[s] (sous la forme d'une relation entre phénomènes, d'une structure temporelle ou spatiale) d'une régularité empirique sur l'observation de laquelle il y a un assez large consensus dans la communauté scientifique » (NUNINGER et al. 2017, p. 70).

Une fois les faits stylisés relatifs aux changements structurels identifiés, le projet ambitionnait de parvenir à caractériser les principaux leviers et catalyseurs de ces évolutions, et ainsi de proposer des processus explicatifs et génériques. Par exemple, quels étaient les effets spatiaux d'une période de violence sur un système de peuplement ? Ce système tendrait-il à se disperser, à se concentrer, à se hiérarchiser ?

Modéliser avec des systèmes complexes. Afin de conceptualiser et formaliser ces faits stylisés liés à des processus spatio-temporels, il avait été choisi de les modéliser en tenant compte de leur nature complexe. Pour arriver à une description systémique aussi parcimonieuse que possible de ces transformations, les membres de TransMonDyn avaient ainsi décidé de modéliser les systèmes affectés et leur évolution, en cherchant à « endogénérer » autant que possible les éléments déclencheurs des changements. Cette endogénération consiste à provoquer les transformations spatiales de manière endogène, c'est-à-dire en les expliquant par les dynamiques propres d'un système plutôt que par une perturbation extérieure au système (on parle alors d'élément exogène). Une fois conçues de manière endogènes, les dynamiques menant aux transfor-

mations peuvent être exprimées sous la forme de phénomènes émergents, les inscrivant dans le paradigme de la modélisation de systèmes complexes que Arnaud BANOS exprime ainsi :

« Selon l’acception la plus courante aujourd’hui, un système complexe est constitué d’un grand nombre d’éléments en interactions non linéaires, situés dans un environnement. Ces éléments (ou entités) actifs, dénommés agents dans la terminologie informatique usuelle, agissent dans et sur cet environnement, qui les influence en retour. Un tel système ne bénéficie pas, de plus, d’un mode de contrôle global, centralisé. Le pouvoir d’action des agents est réduit à une dimension très locale, et certaines structures globales observées sont le fait de processus d’auto-organisation. Dans une telle perspective, les multiples interactions, qui plus est localisées, entre agents peuvent conduire à l’apparition de propriétés à un autre niveau d’observation ou d’agrégation, intermédiaire ou global, non déductibles à partir des simples propriétés des agents. Ces propriétés sont dites émergentes et leur identification constitue l’un des principaux enjeux des théories de la complexité. »

BANOS 2013, p. 39-40

1.2.2 Des processus inscrits dans la longue durée

Une particularité importante du projet TransMonDyn et des systèmes complexes modélisés en son sein est leur inscription dans le temps long, et pour la plupart, dans un temps long situé dans un passé lointain relativement aux thèmes habituellement traités en géographie.

Identifier des « régimes » et des « transitions ». Ce recul historique, tant en termes de position que d’étendue temporelle, s’exprime notamment par la manière dont les transformations spatiales sont décrites. On les décrit comme des « transitions » dans le système de peuplement, selon une logique qui rappelle les transitions de phase chimiques⁷. Ces transitions occurrent de manière brusque relativement aux « régimes » qui les précèdent (« régime 1 ») et en découlent (« régime 2 »).

Pour décrire ces termes, on peut s’appuyer sur l’une de ces transitions, originellement dénommée « Transition 8 » (de son rang dans l’ordre chronologique des cas d’étude) ou « 800-1100 : polarisation et territorialisation en Europe du Nord-Ouest » (voir le tableau 1.1), qui constitue aussi le cas d’étude sur lequel ce travail de thèse repose.

Dans cette transition⁸, le régime 1, hérité de l’antiquité tardive, est caractérisé par un pouvoir centralisé et un habitat majoritairement dispersé et

7. Dans l’ouvrage « Peupler la Terre » (SANDERS 2017), qui constitue un bilan du projet TransMonDyn, un chapitre entier (PUMAIN et al. 2017b) porte sur le choix de cette terminologie.

8. La description originale peut être consultée sur le site internet du projet TransMonDyn : www.transmondyn.parisgeo.cnrs.fr/transitions-etudiees/cas-empiriques/t8

constitué de villages de faible population. La transition en tant que telle est caractérisée par un émiettement des pouvoirs seigneuriaux, l'essor urbain, une polarisation de l'habitat rural et par une stabilisation de l'habitat. Après cette transition, dans le régime 2, le système féodal a été mis en place, l'habitat est polarisé autour des églises paroissiales et socialement structuré par des communautés rurales.

Longue durée et modélisation. L'inscription dans le passé et sur la longue durée pose plusieurs problèmes à la modélisation. En premier lieu, sur le plan conceptuel, l'étude d'un système sur le temps long impose d'en caractériser les composantes de manière pérenne. L'exemple des « villes » en est caractéristique : la définition de ces entités socio-spatiales varie selon les disciplines, mais aussi selon les époques considérées. Pour certains, parler de villes pour caractériser les agglomérations secondaires héritées de l'antiquité constitue ainsi un anachronisme complet. La première difficulté d'un projet tel que l'étude d'une transition est donc déjà de formaliser, de manière ontologique, des objets valides sur l'ensemble de la période étudiée, alors même que presque par définition, ces objets sont amenés à, potentiellement, se transformer d'un régime à l'autre, jusqu'à parfois même changer d'identité.

Longue durée et sources : le problème des « connaissances expertes »
Une autre difficulté majeure auquel le projet TransMonDyn devait faire face, intrinsèquement à la volonté de modéliser des transitions sur la longue durée, est la nature forcément lacunaire des sources empiriques sur lesquelles reposent les connaissances de ces transitions. Plus l'on remonte dans le passé, moins les données empiriques sont nombreuses (voir figure 1.1-A), et plus elles sont incomplètes et incertaines. Pour augmenter la quantité de données, on peut alors procéder à de la numérisation de sources anciennes (B), ou simuler les processus anciens pour produire des données (C).

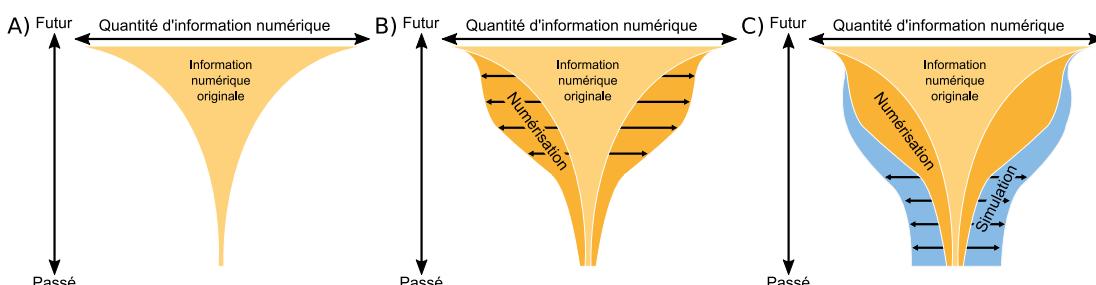


FIGURE 1.1 – Le « champignon informationnel », d'après KAPLAN (2013).

L'exercice de la modélisation demande pourtant une quantité substantielle de données, et surtout que ces données soient homogènes en terme de couverture spatio-temporelle et en terme de certitude face au risque que des « effets de source » ne biaissent les résultats. Afin d'augmenter la couverture spatio-temporelle, on a recours à des sources variées – matérielles, écrites, voire biologiques –, par nature hétérogènes.

Les éléments empiriques ne peuvent dès lors reposer que sur une connaissance large et diversifiée des périodes et régions étudiées. Cette connaissance, que l'on peut qualifier d'experte, est l'apanage des « thématiciens » du projet. Le modélisateur, qui ne peut imaginer acquérir l'ensemble des connaissances

expertes des thématiciens, doit accepter de leur faire entièrement confiance quant aux éléments empiriques mobilisés dans le modèle et par les biais desquels les modèles seront ensuite évalués.

Cela mène à une double implication en matière de légitimité. Pour le modélisateur, cela implique qu'il sera toujours nécessaire de s'en remettre à la connaissance experte d'une personne (ou d'un groupe), sans possibilité d'ailleurs d'enrichir ces connaissances de son côté : mobiliser une référence scientifique dans une thématique de recherche inconnue ou distante, c'est risquer de citer des travaux non reconnus par la communauté, dépassés, ou encore anecdotiques. Dans cette thèse, les tentations de référencer certains éléments empiriques en menant des recherches bibliographiques ont été nombreuses, mais sans vision d'ensemble de l'historiographie de ces sujets, cela n'ajouterait en fait aucun gage de scientificité.

Pour le thématicien, cela implique d'être en permanence « malmené » par un modélisateur en recherche de connaissances plus précises et exhaustives. Pierre GARMY le résume ainsi à propos de son expérience en tant que thématicien dans le projet TransMonDyn :

« La collaboration interdisciplinaire entre thématiciens et modélisateurs suppose le dépassement de deux contradictions : exhaustivité tendancielle vs parcimonie recherchée d'une part et complexité vs schématisation ou stylisation d'autre part.

Il existe un véritable paradoxe entre l'incomplétude de fait des données – que les spécialistes disciplinaires cherchent à combler progressivement par l'enrichissement continu des corpus au moyen de recherches appropriées, rentabilisées par la définition de problématiques préalables aussi pointues que possible – et l'attente des interlocuteurs modélisateurs qui veulent tout savoir et se bercsent souvent d'illusions sur l'état de l'art réel dans chaque champ de connaissances. »

GARMY P., « Annexe 1 - Retour sur expérience d'un “thématicien” », in OURIACHI et al. (2017, p. 476)

1.2.3 Un contexte fortement interdisciplinaire

L'interdisciplinarité est le dernier élément marquant du contexte dans lequel ce travail de thèse a été initié, et qui l'aura influencé et guidé jusqu'à son terme. Celle-ci est au cœur d'un projet tel que TransMonDyn, où collaboraient des géographes, archéologues et historiens, informaticiens et géomathématiciens, épistémologues, linguistes, mathématiciens... Une expérience précédente, Archaeomedes (ARCHAEOEDES 1998), avait déjà posé les bases d'une certaine interdisciplinarité entre géographes et archéologues⁹, et plusieurs de ses membres historiques se sont donc retrouvés dans TransMonDyn. Ce « noyau dur » a constitué le pôle auxquels se sont agrégés d'autres chercheurs des dis-

9. On se réfère ici aux chercheurs en géographie humaine et/ou urbaine. En géomorphologie, géophysique et géographie environnementale, les collaborations entre géographes et archéologues, sur des questions techniques notamment, sont plus fréquentes et anciennes.

ciplines mentionnées, et y compris en archéologie, des chercheurs qui avaient exprimé un désaccord quant aux approches très empruntes de systémique d'Archaeomedes (voir FERDIÈRE et al. 2000, par exemple).

Dans le projet TransMonDyn, on a souvent distingué les rôles des participants selon qu'ils étaient « thématiciens », porteurs de connaissance experte vis-à-vis des processus étudiés, ou « modélisateurs », porteurs d'une connaissance experte vis-à-vis de la manière de modéliser ces processus. Au sein même de ces catégories, l'interdisciplinarité était fortement présente et a orienté les approches mises en place dans le projet.

Interdisciplinarité et thématique. En premier lieu, de manière évidente, une forte interdisciplinarité résulte nécessairement en des points de vue disciplinaires différents sur des thématiques communes. Il me semble que ces points de vue sont fortement liés aux sources manipulées. Les données statistiques et issues d'enquêtes contemporaines de la géographie urbaine, les textes et la littérature grise historiques ou les traces et matériaux archéologiques, tous ces éléments sur lesquels les disciplines se constituent influencent fortement la manière de considérer un thème commun, comme par exemple celui de l'étude d'un système de villes donné. Les géographes en analyseront les interactions et populations au moyen de données de recensement ou d'analyses des comportements des acteurs territoriaux. Les historiens se référeront aux sources historiques, le plus souvent issues des élites ou structures dominantes, qui donneront sans doute des informations précises sur les liens politiques ou religieux entre les villes. Les archéologues chercheront dans les traces matérielles des points communs en terme de nature de construction, de répartitions spatiales à l'échelle des lieux de fouilles afin d'identifier par exemple l'existence d'échanges entre les agglomérations. Ces descriptifs, certes caricaturaux, montrent bien que pour une thématique commune, la disponibilité et la couverture spatio-temporelle des sources privilégiées par telle ou telle discipline orienteront nécessairement l'approche.

Ces sources et perspectives différentes orientent aussi fortement les ontologies et lexiques utilisés. On a donné l'exemple des villes, mais au-delà, chaque discipline use de son propre jargon et y attribue des concepts spécifiques. Un des défis de l'interdisciplinarité, du point de vue des thématiques, est alors de parvenir à tout expliciter, en usant d'un formalisme commun (définitions, ontologies...), de manière à ne pas laisser de place à l'implicite disciplinaire.

Une approche variée, en termes de recherche d'explication des processus observés, découle nécessairement de ces différences de vocabulaire et de sources considérées. Dans cette thèse, il me semble que c'est assez visible, on a essayé de concilier les explications en intégrant l'ensemble des éléments constitutifs du système modélisé qui semblaient, pour l'un ou l'autre des thématiques, pouvoir apporter une part d'explication. Il fallait ainsi concilier la vision d'une géographe modélisatrice qui cherchait à expliquer la polarisation aux moyens d'attractions différencierées, la vision d'une archéologue pour qui les effets de lignages seigneuriaux et la territorialisation due aux paroisses permettaient de comprendre cette même polarisation et fixation, ou encore un

historien pour qui les communautés rurales/agraires/paysannes émergentes étaient un facteur indispensable de la fixation de l'habitat rural.

Ce dernier point est aussi l'occasion d'estomper la différenciation, forte dans TransMonDyn, entre « thématiciens » et « modélisateurs ». A mon sens, l'un des accomplissements de ce projet est aussi d'avoir montré que la frontière entre ces « rôles » est fine, et extrêmement dépendante d'un positionnement particulier dans le cadre d'un projet particulier. Au-delà du poncif qui reviendrait à dire que chacun est tour à tour modélisateur ou thématicien selon son interlocuteur, il me semble ainsi pouvoir retirer de l'expérience TransMonDyn que pour modéliser en interdisciplinarité, chacun doit en même temps adopter ces deux postures, devenant un « modélicien » selon les termes d'Arnaud BANOS :

« Sous le néologisme “Modélicien”, je désignais un type d’interaction très différent, qui avait amené Robin Cura et Cécile Tannier, tous deux géographes et modélisateurs, à s’investir avec une telle intensité et une telle profondeur dans la problématique historique de leur groupe de travail qu’ils en étaient progressivement venus à s’exprimer comme s’ils avaient été eux-mêmes longuement formés à cette discipline (cf. [CURA et al. 2017b]). L’évolution était tellement flagrante et systématiquement soulignée par les collègues historiens eux-mêmes que j’en suis même venu à émettre la possibilité d’un syndrome de TransMonDyn (en référence bien sûr au syndrome de Stockholm), défini de la manière suivante : “phénomène psychologique selon lequel des modélisateurs partageant longtemps la vie des thématiciens développent une empathie, voire une sympathie, ou une contagion émotionnelle avec ces derniers, devenant ainsi des modéliciens”. »

BANOS A., « Annexe 3 - Petite typologie “empirique” des modélisateurs », in OURIACHI et al. (2017, p. 484)

Je crois que c'est là l'une des conditions permettant à un projet de passer de la pluridisciplinarité, « juxtaposition disciplinaire » (GRAVIER 2018, p. 14), à une interdisciplinarité définie comme une « coopération de plusieurs disciplines autour de projets communs » (GRAVIER 2018, p. 14, citant AERES (2014) p. 19).

Interdisciplinarité et méthodologie. Au-delà des difficultés que l'interdisciplinarité implique sur le plan thématique, on peut aussi en constater des retentissements en termes méthodologiques, très visibles dans le projet TransMonDyn. La présence de géographes-modélisateurs, de géomaticiens, d'informaticiens, de mathématiciens ou encore de philosophes dans un projet génère nécessairement des approches diversifiées en matière de modélisation. Le mathématicien favorisera en effet des formalismes mathématiques tels que les systèmes dynamiques ou la théorie des jeux, les philosophes préféreront une modélisation ontologique des processus à l'œuvre, le géographe préférera une entrée spatiale, potentiellement statistique par exemple autour de modèles gravitaires, et l'informaticien usera de ses habitudes en modélisation à base d'agents, proches de la programmation à base d'objets communicants.

Le panorama des approches de modélisation mobilisées dans les transitions de TransMonDyn illustre cette diversité de pratiques : on y retrouve beaucoup de modèles à base d'agents, mais aussi des modèles basés sur la théorie des jeux, ou encore un modèle conceptuel basé sur une ontologie dynamique (FAVORY et al. 2018). En considérant l'historique des approches de modélisation du projet, on pourrait de plus y ajouter des modèles graphiques, sagittaux ou chorématiques. Ces approches ont en commun une vision systémique des processus, mais les modalités de leurs mises en place s'effectuent selon des langages (informatiques ou formels) et des paradigmes (mathématiques, statistiques ou informatiques) très différents.

Au sein même des modèles implémentés au travers de systèmes multi-agents, l'hétérogénéité est forte : entre un modèle KISS¹⁰, un modèle descriptif, ou encore un modèle comportemental individu-centré, les paradigmes mobilisés sont entièrement différents et surtout ont des implications diamétralement opposées en matière de conception et d'évaluation. L'interdisciplinarité, de manière générale, requiert une forte explicitation des concepts et méthodes employés. Dans le cadre de projet collectifs de modélisation, c'est vrai pour l'aspect thématique – chacun doit comprendre ce qui est modélisé afin de ne pas en mésinterpréter les résultats – aussi bien que pour l'aspect méthodologique – chacun doit comprendre la manière dont les objets sont modélisés pour les mêmes raisons. L'interdisciplinarité, sur le plan méthodologique, demande donc aussi une forte explicitation afin d'assurer la compréhension partagée des méthodes mises en places, des biais qu'elles impliquent, et des limites qu'elles comportent.

Le contexte dans lequel cette thèse a été imaginée et initiée, retracé dans cette partie, permet de mieux comprendre les enjeux – méthodologiques et thématiques – de ce travail. Les membres du groupe de travail de la « transition 8 » de TransMonDyn ont continué à œuvrer ensemble, même après les fins officielles (2014) et effectives (2017, à la parution de l'ouvrage collectif « Peupler la Terre » dirigé par SANDERS (2017)) de ce projet de recherche interdisciplinaire. Le modèle SimFeodal, et cette thèse plus largement en constituent l'un des aboutissements.

Ma thèse, en tant que telle, n'a pourtant pas été réalisée dans le cadre officiel de l'ANR TransMonDyn. Le présent travail de thèse a ainsi bénéficié d'un financement du LabEx DynamiTe¹¹, proposé par le groupe de travail « Sys-

10. Caractérisés ainsi par AMBLARD, ROUCHIER et BOMMEL (2006, p. 110) : « Un premier courant, qui est une application directe du rasoir d'Occam, aussi appelé “principe de parcimonie”, le mouvement KISS (Keep It Simple, Stupid !) recommande de construire des modèles qui soient analysables par la suite, suffisamment simples pour être disséqués par un humain qui observe les simulations attentivement [...]. Le positionnement de ce courant peut se résumer ainsi : rien ne sert de concevoir des modèles dont on ne pourrait étudier sérieusement les propriétés et oublier ainsi la validation interne, définie comme l'existence des bonnes propriétés du modèle dans le cadre formel de ce dernier ».

11. Laboratoire d'Excellence « Dynamiques Territoriales et Spatiales », ANR-11-LABX-0046, dans le cadre du programme « Investissements d'Avenir ».

tèmes de Peuplement sur le temps long »¹², dont l'objectif initial était de « croiser les connaissances et savoir-faire de géographes, historiens, archéologues et mathématiciens pour décrire, conceptualiser et modéliser les dynamiques du peuplement sur le temps long dans leurs expressions spatiales et leurs rythmes temporels »¹³. Au regard de ces objectifs, on comprendra aisément les similarités avec TransMonDyn, que ce soit en termes d'interdisciplinarité ou de démarche.

Dans les faits, ce groupe de travail « temps long », dans lequel je me suis inscrit tout au long de mon travail de thèse, a surtout œuvré à la résolution d'une des difficultés de l'interdisciplinarité décrite plus haut : la mise en place d'un vocabulaire commun et explicite sur les concepts et notions liés à la description et à la modélisation des systèmes de peuplement sur le temps long. La réalisation d'un « lexique spatio-temporel illustré » – nom provisoire qui a par la suite été abandonné – qui en résulte, intitulé « « Les concepts-clés des systèmes de peuplement sur le temps long » (ajouter ref, voir avec Lena), a nourri l'ensemble de cette thèse, en contribuant largement à mettre au clair les concepts employés. À ce titre, le groupe de travail du LabEx a aussi constitué un contexte fort, en mettant en place des discussions interdisciplinaires, autour des mêmes disciplines mais avec des communautés de chercheurs et d'approches de ces disciplines distinctes de celles de TransMonDyn.

1.3 Questionnement initial, obstacles et pistes de résolution

Entre mon projet de recherche initial, proposé au LabEx DynamiTe, et le présent rendu, le sujet, les questionnements et surtout les approches mises en places pour y répondre ont fortement évolué. Les grands axes du positionnement sont eux restés constants, de même que la thématique d'ensemble. Le titre initial de ce projet montre qu'il s'agit plus d'un changement de point de vue sur les approches à mobiliser que sur le thème en lui-même. Ce projet s'intitulait en effet originellement « Exploration et analyse de données spatio-temporelles : application à la modélisation des transformations des systèmes de peuplement sur le temps long ». On notera que les principales idées sont communes au titre actuel (« Accompagner la modélisation des systèmes de peuplement par l'exploration interactive de données spatio-temporelles »¹⁴), mais que l'ordre en a été bouleversé, que la logique d'accompagnement a été ajoutée (même si elle était dans le projet de recherche, cf. *infra*) et que certaines composantes ont été spécifiées.

Le programme de recherche initial était orienté autour de trois tâches :

1. « Mise en place d'une démarche d'accompagnement des thématiciens dans la modélisation »;

12. Co-dirigé par Patrice BRUN, Marie-Vic OZOUF-MARIGNIER et Lena SANDERS.

13. Descriptif du groupe de travail : <http://labex-dynamite.com/fr/recherches/groupes-travail/les-systemes-de-peuplement-sur-le-temps-long/>

14. A corriger avec titre définitif.

2. « développement d'une plateforme d'exploration de données spatio-temporelles : application à des transitions dans le système de peuplement »;
3. « analyse des transitions du système de peuplement modélisées ».

Ces grandes dimensions d'analyses sont toujours présentes dans la présente thèse, quand bien même largement ré-organisées et hiérarchisées différemment. Sans faire un retour complet et exhaustif sur les évolutions de ma recherche, il me semble utile ici de revenir sur ces éléments¹⁵, les obstacles qu'ils ont rencontrés et les solutions choisies pour les résoudre. Cela permettra de mieux cerner le positionnement de ce travail dans le champ de la modélisation en géographie.

1.3.1 Accompagner la modélisation

L'ambition d'origine était d'accompagner la modélisation des transitions en « [extrayant] les connaissances des thématiciens et [en les décryptant] afin d'en tirer des processus de causalité, de dépendance et d'inter-relations ». Il me semble maintenant que le terme de « guider la modélisation » aurait plus fidèlement représenté l'approche sous-jacente.

Guider la modélisation de cas d'études. Dans les faits, en matière d'accompagnement, je cherchais à formaliser les discours experts des thématiciens en vue de leur modélisation. Cette formalisation se serait appuyée sur des méthodes graphiques à l'aide de « briques de bases », modèles schématiques d'un type de processus ou d'interaction. Pour être généralisable à toutes les transitions identifiées dans TransMonDyn, il aurait fallu que celles-ci atteignent une certaine homogénéité dans le degré de maturité de leur conceptualisation, mais aussi que l'ensemble des thématiciens soient en accord avec ce type très généralisant et essentialisant de modélisation.

D'une part, on le constate à la lecture de l'ouvrage collectif issu du projet, les modèles ont atteint des niveaux très variés d'avancement, mais ils ont aussi été réalisés selon des paradigmes tout aussi variés, voire opposés dans leur démarche (cf. Interdisciplinarité et méthodologie, p. 23). Un type générique de modélisation, ou de ré-expression des modèles générés par les groupes de travail, n'aurait donc pas été applicable du tout à l'ensemble des transitions. Il fallait nécessairement en sélectionner un sous-ensemble homogène, ce qui n'est foncièrement possible que quand les modélisateurs impliqués dans l'accompagnement à la modélisation sont identiques et mettent en place la même approche. Au regard du seul exemple de TransMonDyn où un même modélisateur a collaboré à deux transitions différentes – Alain FRANC, mathématicien, qui a participé aux transitions 9 (OURIACHI, BERTONCELLO et FRANC 2018) et 12 (BRETAGNOLLE et FRANC 2018), voir tableau 1.1 –, on ne peut que noter que les types de modélisation sont très différentes (théorie des jeux dans un cas, modèle descriptif statistique dans l'autre). Matériellement, il paraissait dès lors illusoire de mener une expérience de modélisation sur plusieurs transitions.

15. Les titres des sous-parties reprennent les trois tâches du projet initial, mais ont été renommées pour une meilleure correspondance au contenu réel du projet.

Surtout, cette posture de modélisateur « imposant » ses propres outils et approches de modélisation ne pouvait s'inscrire dans un projet à volonté réellement interdisciplinaire tel que TransMonDyn. D'une part, parce que « le modélisateur n'est pas omni-compétent » (BANOS 2013, p. 77), et d'autre part parce que le « le modélisateur doit cesser de proposer des solutions uniques et optimales à des problèmes complexes » (BANOS 2013, p. 79). Cela interroge le positionnement du modélisateur vis-à-vis des thématiciens « avec » lesquels il cherche à concevoir un modèle. Sa posture doit-elle être dirigeante, prescriptive, accompagnante ou encore se borner à une simple assistance technique ?

De la prescription à l'accompagnement. J'ai très vite réalisé que la proposition d'un cadre commun de modélisation ne pouvait fonctionner au regard des spécificités de chacune des approches mises en places pour décrire les transitions. Pour que chacun investisse son temps et son énergie dans une expérience de modélisation, qui peut se montrer extrêmement frustrante pour les thématiciens (OURIACHI et al. 2017, p. 470), il faut avant tout veiller à répondre aux attentes vis-à-vis de l'usage du modèle. En d'autres termes, pour que des chercheurs consacrent du temps à un travail, encore faut-il que celui-ci leur apporte quelque chose. L'identification de qui « profite » d'un modèle¹⁶ est claire dans le cadre commun de la modélisation d'accompagnement (voir COMMOD 2015, par exemple), où l'on cherche à sensibiliser une population aux dangers et risques qu'elle encoure. Dans le cadre d'un projet de recherche où les objectifs des modèles sont plus théoriques, où les attentes vis-à-vis des modèles sont plus diversifiées, voire où des réticences vis-à-vis de la modélisation peuvent être présentes, il me semble qu'une conception collective du modèle et de l'approche de modélisation est la seule susceptible de rassembler les énergies nécessaires.

Dès lors, la modélisation ne pouvait se faire qu'en gardant à l'esprit, constamment et tout au long, les attentes et envies de chacune des parties prenantes. Cela n'est pas possible dans une approche prescriptive de « modélisateur éclairé », et ne peut se construire que dans un consensus permanent sur la manière de procéder, sous risque de voir l'expérience échouer avant son terme. Pour que le projet de modélisation interdisciplinaire aboutisse, le modélisateur doit y investir au moins autant de temps que le thématicien, participer à toutes les étapes de modélisation, depuis la conceptualisation jusqu'à l'évaluation et l'analyse des résultats. Comme le relate Arnaud BANOS :

« Le travail en interdisciplinarité suppose une alchimie particulière, dont l'existence n'est jamais acquise et qui doit être entretenue, nourrie en permanence. Dans cette quête incessante et toujours renouvelée, les interactions entre modélisateurs et non modélisateurs – surtout si ces derniers s'inscrivent dans des disciplines relevant des sciences humaines et sociales – prennent une saveur tout à fait singulière [...] »

L'alchimie dont je parlais au tout début de mon propos suppose une certaine forme d'intimité. Et du temps. Une denrée de plus en plus

16. « who benefits in what manner from the simulation » selon les mots de LAKE (2014, p. 260)

rare dans nos métiers. »

BANOS A., « Annexe 3 - Petite typologie “empirique” des modélistes », in OURIACHI et al. (2017, p. 483,485)

L’« intimité » et le temps nécessaire rendent impossible, dans le cadre d’un programme de recherche temporaire, la modélisation en profondeur de plusieurs transitions. J’ai ainsi considéré que mieux valait se concentrer sur la modélisation d’une unique transition, et y investir le temps qu’il faudrait, plutôt que de chercher à multiplier les expériences de modélisation de plusieurs transitions, ce qui n’aurait débouché au mieux que sur des prototypes inachevés, nécessairement frustrants pour les thématiciens et modélisateurs impliqués.

1.3.2 Explorer et confronter données empiriques et simulées

La deuxième tâche du projet initial de thèse était de construire une plate-forme interactive dédiée conjointement à l’exploration des données empiriques sur lesquelles sont fondées les modèles, à l’exploration des données simulées produites par ces modèles, et enfin à la confrontation de ces données empiriques et simulées.

D’une modélisation descriptive à une modélisation dynamique. L’idée sous-jacente était de compléter les connaissances expertes autant que possible en mobilisant les données empiriques existantes afin de faciliter/accélérer/-étailler les faits stylisés identifiés lors de la conception des modèles conceptuels. Je savais que les archéologues, en particulier, du projet TransMonDyn s’appuyaient sur de vastes corpus de données correspondant à l’enregistrement et à la formalisation informatique de matériaux issus de fouille. Les transitions portées par des géographes, elles-aussi, pouvaient compter sur des données exhaustives et complètes sur le territoire et les périodes étudiées. J’envisageais donc de créer un outil permettant à chacun, thématiciens compris, d’explorer les données compilées pour chaque transition, et ainsi de contribuer à y trouver des corrélations, des récurrences spatio-temporelles ou autres motifs dans les données qui auraient pu enrichir et faciliter la conception des modèles.

C’était sans compter sur l’état réel de la documentation de la majorité des transitions : quand les données existaient, elles n’étaient ni harmonisées ni homogènes et surtout très lacunaires. À une exception près, les modèles finalement issus de TransMonDyn sont d’ailleurs tous « *theory-driven* » plutôt que « *data-driven* »¹⁷ : ils reposent sur des connaissances expertes et des hypothèses thématiques plutôt que sur une information quantifiée qui serait directement injectée dans les modèles. Il aurait été vain de vouloir explorer ces données, hétérogènes au sein même des transitions, pour espérer en tirer une quelconque connaissance qui aurait complétée l’expertise thématique de chercheurs ayant étudié des thématiques localisées et datées pendant des dizaines d’années.

17. Pour une bonne comparaison de ces approches, voir MATHIAN et SANDERS (2014, p. 120–122).

Exploration de modèles et confrontations de données. Pour explorer les modèles, c'est-à-dire les comportements auxquels ils pouvaient aboutir, et mener ainsi une validation de ces modèles, je comptais mobiliser les dernières méthodes d'exploration automatisée de modèles, qui étaient notamment en cours de développement au sein du projet ERC GeoDiverCity¹⁸ auquel je contribuais aussi. Fondamentalement, le présupposé de telles méthodes (**déjà renvoyer au chapitre 7 ?**) est que les modèles construits soient aussi parcimonieux que possibles, dotés d'une quantité minime de paramètres et d'indicateurs de sortie. En automatisant les analyses, il aurait été aisément de confronter ces sorties aux données empiriques disponibles, la simulation informatique ayant l'énorme avantage de laisser au modélisateur choisir le format, le type et la quantité des données générées.

Pourtant, le choix d'un compromis de pratique entre modélisateurs et thématiciens ne pouvait pas déboucher sur des modèles KISS : ceux-ci demandent au thématicien de faire preuve d'une forte abstraction quant aux processus et entités modélisés, ce qui demande d'ordinaire « un apprentissage, une familiarisation progressive avec un mode de pensée qui n'est pas génétiquement le sien » (GARMY in OURIACHI et al. 2017, p. 477).

Avec des modèles plutôt descriptifs mieux adaptés à des premières expériences de modélisation, la tâche d'exploration est plus complexe, sans parler même d'une éventuelle validation. Cette exploration des modèles, à partir des données issues de simulation, ne peut alors être que manuelle. À ce titre, la plate-forme interactive de confrontation des données pouvait avantageusement être repensée pour servir à l'exploration des données simulées. Au lieu de comparer des données empiriques et des données de simulation, elle servirait à explorer des données simulées, et à les confronter à d'autres données simulées afin de pouvoir comparer différents modèles ou versions de modèles par l'entremise de l'exploration interactive de données.

1.3.3 D'un méta-modèle à un retour sur expérience de modélisation

Le projet initial visait enfin à aller vers l'expression d'un modèle générique de transition dans les systèmes de peuplement – un méta-modèle –, qui serait issu d'une analyse comparée des différents modèles. La conception d'un tel méta-modèle ne pouvait reposer que sur une analyse poussée de plusieurs modèles de transitions, formalisés de la même manière et avec des approches KISS homogènes. En d'autres mots, sans la compléction des deux premières tâches du projet initial, cette étape de méta-modélisation était irréalisable.

Pour parvenir à cet objectif, toutefois, j'identifiais l'importance de « la mise en place d'une démarche facilitant le dialogue et la compréhension interdisciplinaire ». C'est finalement dans cette direction que j'ai orienté mon travail de thèse, en cherchant à concevoir des « interfaces », méthodologiques

18. ERC Advanced Grant 269826 GeoDiverCity, dirigé par Denise PUMAIN - <http://geodivercity.parisgeo.cnrs.fr>

et techniques, en vue d'aider à la modélisation de ces transitions d'une manière qui soit satisfaisante pour chacun des acteurs impliqués, modélistateurs compris. C'est cette démarche qui est précisée dans la partie suivante et que l'ensemble de la thèse cherche à définir sur la base d'un retour sur une expérience fructueuse de modélisation interdisciplinaire. Elle permet de définir mon positionnement dans le champ de la modélisation géographique.

1.4 Un positionnement résolument interdisciplinaire, facilité par la conception d'interfaces exploratoires

Les parties précédentes ont permis de définir et de préciser l'objet de recherche de ce travail de thèse, la modélisation de transitions dans le système de peuplement.

Le contexte dans lequel cette recherche s'est déroulée (section 1.2), entre les projets TransMonDyn et le groupe de travail « temps long » du LabEx Dynamite, a amené ce thème et montré les enjeux de la modélisation des transitions comme thématique interdisciplinaire, faite de l'étude de processus spatiaux complexes et de leur inscription dans le temps long.

Ma formation initiale et son extension en tant qu'ingénieur d'étude à l'UMR Géographie-cités (section 1.1) ont orienté le choix des méthodes : mobiliser le cadre méthodologique des modèles à base d'agent, en donnant une forte place aux mécanismes géographiques et géométriques, et veiller à l'importance de la représentation graphique dans leur usage.

Le questionnement initial et son évolution (section 1.3) ont permis de recentrer l'ambition d'ensemble de cette recherche : d'une volonté de créer un métamodèle à celle de documenter et promouvoir l'approche d'ensemble mise en place tout au long de cette thèse.

Dans cette dernière partie, je souhaite préciser et justifier cette approche de modélisation interdisciplinaire qui est résolument inscrite dans la co-construction (1), s'appuie sur la mise en places d'interfaces disciplinaires (thématiques et méthodologiques) pour parvenir à faciliter cette co-construction interdisciplinaire (2), et s'exprime sous la forme d'une démarche exploratoire, aussi bien pour la conception du modèle que pour son exploration (3).

1.4.1 Favoriser une co-construction interdisciplinaire

Quand on cherche à initier une démarche de modélisation collective, qui plus est en situation d'interdisciplinarité, les approches de modélisation d'accompagnement (« ComMod », pour *companion modelling*) paraissent incontournables dans le champ francophone de l'étude des systèmes complexes. Il me semble dès lors important de positionner l'approche défendue dans cette thèse vis-à-vis de la modélisation d'accompagnement, et d'en identifier les points communs et de divergence.

Animer un projet interdisciplinaire. L'approche ComMod est définie par ses créateurs comme « une démarche permettant de faciliter des processus collectifs de décision, en proposant un travail d'explicitation des points de vue et des critères subjectifs auxquels se réfèrent implicitement, voire inconsciemment, les différentes parties prenantes » (COMMOD 2005, p. 167). Les partisans de cette approche utilisent la modélisation de systèmes complexes comme un outil d'interface entre les différents acteurs d'une problématique souvent environnementale. Cette modélisation est pensée comme véritablement collaborative, le modèle servant de support de discussion et de négociation entre les acteurs parfois opposés. La démarche mobilisée, bien ancrée dans le paysage de la modélisation de systèmes complexes, se fonde autour de « cinq étapes incontournables » (COMMOD 2015, p. 41-132) :

1. Identifier et formuler une question clé initiale partagée
2. Co-construire une représentation partagée de la question (méthode « ARDI »)
3. Concevoir et animer un jeu de rôles
4. Concevoir et développer un modèle informatique
5. Suivre le développement et évaluer les effets de la démarche

Cette approche émane de chercheurs impliqués dans des opérations de « recherche-action » (COMMOD 2005, p. 165), et donne dès lors une importance prépondérante au travail de terrain (BARRETEAU et al. 2003, p. 3.3), en particulier comme méthode d'évaluation des modèles produits. Les modélistateurs y sont d'ailleurs présentés comme des « animateurs »¹⁹, dont l'objectif est de pousser au dialogue les « participants », décideurs politiques, acteurs de la société civile ou encore population potentiellement à risque dans les programmes de sensibilisation.

Cette dichotomie entre « animateurs » et « participants » peut rappeler celle que l'on fait entre « thématiciens » et « modélistateurs », mais elle y ajoute une hiérarchie en termes de maîtrise du processus de modélisation dans son ensemble. Dans cette thèse, nous défendons une approche « démocratique », où le modélistateur n'a pas pour vocation de guider les thématiciens, mais bien de construire avec eux, de manière collective, c'est-à-dire de co-construire.

L'utilité d'un « animateur » est toutefois incontestable, notamment pour initier réellement le projet collectif et, de prime abord, réussir à concilier les intérêts thématiques et méthodologiques de chacun des membres impliqués – animateur compris – autour d'un objectif consensuel commun. Dans le groupe de travail de la « transition 8 » de TransMonDyn, c'est Cécile TANNIER qui a joué ce rôle, en mobilisant son expérience de modélisation pour amener les thématiciens à concevoir collectivement un premier modèle conceptuel de la transition, sous la forme d'une ontologie (TANNIER et al. 2014).

Un projet collectif et intégrateur. Dans l'approche ComMod, l'implémentation informatique des modèle conceptualisés est une option, concurrente au développement d'un jeu de rôle, qui peut être mieux adaptée aux problématiques modélisées (COMMOD 2015, p. 96-97). Le modèle de simulation joue

19. Dans la méthode « ARDI » (Acteurs, Ressources, Dynamiques et Interactions) (ETIENNE 2009) qui est au cœur de la démarche ComMod.

donc le rôle de compagnon dans le processus de modélisation, mais n'est pas un objectif en soi. Le développement du modèle de simulation demande ainsi des compétences informatiques particulières, difficiles ou peu stimulantes à acquérir dans le cadre d'un projet caractérisé par le « peu de temps disponible et l'hétérogénéité des savoir-faire informatiques des participants et la diversité de leurs attentes en la matière » (COMMOD 2015, p. 29).

D'après ma compréhension de la démarche ComMod, l'implémentation est alors le plus souvent réalisée par des modélisateurs externes au projet et le modèle permet de tester les hypothèses des participants ou de les faire évoluer. Cela place le modélisateur-informaticien dans une position extérieure mais aussi surplombante. D'où un risque que le modèle implémenté soit considéré comme « l'implémentation » du modèle conceptuel plutôt que comme une de ses implémentations possibles, et constitue donc l'unique référentiel d'évaluation de la démarche. Cela place les participants dans une démarche clientéliste, plus proche de la pluridisciplinarité que de l'interdisciplinarité, que le texte suivant de TUKEY me semble bien résumer, en remplaçant le « statisticien » par l'« informaticien modélisateur ».

« Like every other methodology, statistical-and-quantitative methodology has fostered a separation of roles, here into “statistician” and “client”. Today these roles are usually embodied in separate people. Tomorrow more persons will play both roles. But these roles will not melt together, and the need to consult another person will not altogether disappear [...] »

Too often the client (whether or not a social scientist) looks to the statistician as a man who applies the final stamp of approval – perhaps by saying, “This result is significant”. Too often the statistician looks upon himself as a guardian of the proven truth – sometimes feeling it appropriate to say “That difference is not significant at 5%, *and hence* you should act as if it were zero”. The roles of “client seeking stamp of approval” and “statistician guarding the proven truth” are clearly rewarding to client and statistician respectively, as persons, though they are detrimental to progress and to the advance of science. »

TUKEY 1986, p. 145

Pour la conception et l'implémentation de SimFeodal, nous avons cherché à suivre une approche plus intégratrice, en séparant moins nettement les rôles de thématicien, de modélisateur, voire d'« implémenteur ». Si chacun de ces rôles a des compétences particulières peu accessibles aux autres, l'idée était tout de même d'échanger au maximum sur chacun des aspects du modèle de manière à les rendre plus compréhensibles. Les explications thématiques à un choix de valeur de paramètre devaient être explicitées et justifiés, de même que les partis-pris et biais de telle logique d'interaction entre agents, ou encore à l'instar de choix d'implémentation, par exemple dans le point de vue adopté dans un mécanisme via-à-vis des actions d'un type d'agent (cf. encadré chap2 ?).

Sans chercher à ce que chacun des chercheurs impliqués dans la construction de SimFeodal ne devienne omnicomptént, notre approche visait toutefois, dans la mesure de possible, à ce que chacun soit en mesure de comprendre et donc de défendre, au moins dans les grandes lignes, les choix de modélisation et d'implémentation qui seraient à réaliser.

Une position de « modélisateur-géographe ». Dans cette approche de co-construction, on essaie de faire en sorte que chacun partage un socle de connaissances commun de manière à pouvoir comprendre les implications des différentes décisions, conceptuelles, méthodologiques ou techniques. Thématiciens et modélisateurs devaient donc tendre vers l'objectif, théorique et inaccessible, de devenir des « modéliciens ».

En pratique, chacun a toutefois ses compétences et connaissances spécifiques et ne cherche pas à acquérir entièrement celles des autres. La position de co-construction est donc celle de l'interdisciplinarité, complémentaire autour de sujets communs, plutôt que celle de la transdisciplinarité où les points de vue disciplinaires s'effacent (GRAVIER 2018, p. 14).

Il me semble en effet que ces points de vue disciplinaires sont d'une part difficilement solubles dans des rôles donnés, et d'autre part extrêmement enrichissants dans un projet de co-construction. Ma position, en tant que modélisateur « implémenteur », n'est pas celle d'un informaticien distancié qui réalisera sur commande les lignes de code correspondant au modèle conceptuel. Cette implémentation n'est qu'une partie, non négligeable certes, du travail attendu, mais surtout, elle n'est pas automatique et indiscutable, et elle est profondément influencée par mes propres expériences, envies et connaissances.

Plutôt que celle de pur modélisateur, ma position dans la co-construction de SimFeodal est donc tout à la fois celle de géographe, de modélisateur, d'informaticien, et enfin celle de géomaticien pour une large partie des moyens mis en œuvre pour l'évaluation du modèle.

1.4.2 Mettre en place des interfaces disciplinaires

Dans les projets interdisciplinaires, il est courant qu'un des membres, doté de connaissances dans les disciplines impliquées, joue le rôle de médiateur de par sa position d'interface entre les disciplines. Dans le groupe de travail constitué autour de SimFeodal, il n'y a pas de tel chercheur, et l'interface disciplinaire ne peut se faire qu'au travers d'une construction commune. Ce rôle d'interface, nécessaire à une communication explicite et transparente entre les participants d'un projet interdisciplinaire, est assuré par trois éléments de la démarche mobilisée dans la co-construction de SimFeodal : le processus de modélisation en lui-même; le choix de faire reposer l'évaluation du modèle sur la représentation graphique, la visualisation interprétant cette fonction; la démarche résolument exploratoire, à toutes les étapes de ce processus de co-construction.

Une interface via la modélisation. L'une des conclusions du projet Trans-MonDyn est que la modélisation joue un rôle prépondérant d'incitation au dialogue entre thématiciens et modélisateurs. La modélisation, au moins dans son aspect conceptuel ou ontologique (voir figure 1.2), est en effet reconnue comme un facteur d'explicitation et donc de mise en place de connaissances communes : « C'est l'interaction entre les thématiciens et les modélisateurs (le plus souvent un seul mais parfois deux ou trois) de chaque sous-groupe qui a été moteur dans la construction du modèle. [...] L'approche ontologique, par l'explicitation qu'elle implique, joue un rôle de médiation et facilite les échanges entre thématiciens et modélisateurs » (SANDERS et al. 2018, p. 458).

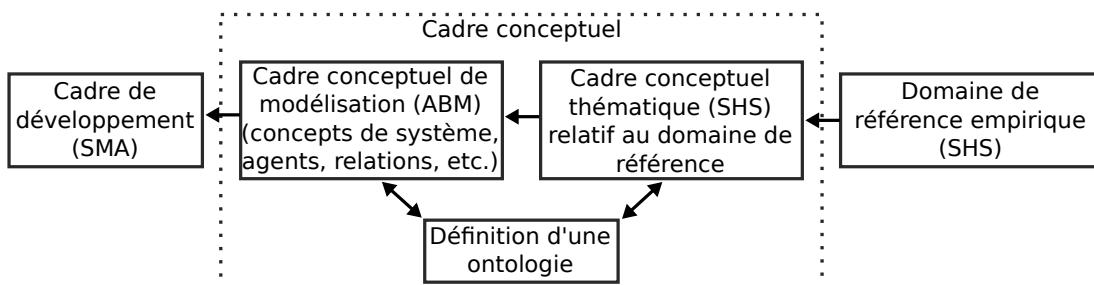


FIGURE 1.2 – « L'ontologie comme médiateur d'un dialogue » de PHAN (2014, fig. 2.7, p. 68).

Il me semble que l'on peut aller plus loin dans ce raisonnement, et le généraliser à tous les domaines du modèle, et donc aussi à l'implémentation sous forme de modèle de simulation. L'explicitation des connaissances est en effet une nécessité pour parvenir au modèle conceptuel, mais elle me semble encore plus importante lors du développement : dans un programme informatique, il ne peut y avoir aucune place au flou parce que l'ordinateur exécute sans chercher à interpréter. Les lignes de code-source sont à ce titre un formalisme non ambigu, elles expriment précisément ce que la plateforme de simulation exécutera. L'étape d'implémentation, depuis le modèle conceptuel jusqu'au modèle de simulation, force donc plus encore à expliciter tous les choix effectués dans la modélisation.

Les quelques 2 500 lignes de code qui définissent le fonctionnement de SimFeodal ne sont pas exemptes de bugs ou d'erreurs d'implémentation, mais chacune d'elles répond à l'obligation de trancher la manière dont un mécanisme fonctionne. Chacune de ces lignes entérine l'explicitation, par la formalisation informatique, des entités et interactions du modèle. En cela, le développement d'un modèle de simulation émanant du modèle conceptuel ne me paraît pas revêtir d'importance uniquement en matière d'une hypothétique validation, uniquement en matière d'une potentielle utilisation effective du modèle (prédiction etc.), mais aussi et surtout parce qu'il prolonge et renforce l'effet d'interface interdisciplinaire qu'entraîne la conception collective d'un modèle.

Une interface via la visualisation. Dans cette thèse, nous mettons en place une approche fortement basée sur la représentation graphique et l'exploration visuelle. Cette approche caractérise presque chacune des phases du cycle de développement d'un modèle. Le modèle est évalué en menant une

analyse visuelle des sorties de simulation au travers des indicateurs de sortie majoritairement graphiques. La comparaison entre différentes versions du modèle se fait aussi par le biais d'une comparaison visuelle entre les sorties correspondantes. La sensibilité du modèle, enfin, est elle aussi analysée de manière visuelle, au moyen de représentations de la variabilité des indicateurs de sortie en fonction des réplications et valeurs de paramètres choisies.

Dans un chapitre d'ouvrage à paraître (CURA 2020), je développe notamment le parallèle entre modélisation et visualisation en termes d'approches facilitant l'interdisciplinarité. Comme la modélisation à base d'agents, la visualisation est un « langage » compréhensible par le plus grand nombre, ne reposant pas sur une formalisme mathématique parfois excluant. Comme la modélisation, la réalisation d'une représentation graphique pousse à l'explicitation de ce qui est représenté, de l'origine et des particularités des données mobilisées. Comme la modélisation, la visualisation permet ainsi de créer une interface interdisciplinaire – la représentation graphique d'un ensemble de données – qui favorise alors le dialogue interdisciplinaire en le provoquant autour d'un élément accessible à tous les participants à un projet.

Pour ces raisons, les indicateurs de sortie de SimFeodal, les représentations graphiques permettant l'analyse de la sensibilité du modèle, ou encore, plus largement, SimEDB, la plateforme d'exploration des données issues de simulation, remplissent tous le rôle d'interface entre les disciplines du projet, permettant aux géographes, archéologues et historiens de dialoguer autour de représentations explicites, accessibles et intelligibles.

Une interface via l'exploration. Un dernier aspect de la démarche d'ensemble choisie pour ce travail de thèse me paraît en mesure de constituer une interface disciplinaire. Il s'agit de la nature fondamentalement exploratoire du processus (de co-construction et d'évaluation collective du modèle) mis en œuvre dans cette recherche. La sous-partie suivante du chapitre détaille cette approche, mais on peut déjà en exprimer l'intérêt dans un cadre interdisciplinaire.

L'approche exploratoire, qu'elle soit inscrite dans l'analyse de données statistiques²⁰, spatiales²¹, ou encore spatio-temporelles²² permet de favoriser un raisonnement abductif (BANOS 2005). La modélisation, elle aussi, peut être guidée ou influencée par un principe d'abduction (BANOS 2013, p. 77). Pour MORIN (1994), une approche abductive, par « l'invention d'hypothèses explicatives nouvelles », peut créer « des articulations, organisatrices ou structurelles, entre des disciplines séparées et [permettre] de concevoir l'unité de ce qui était alors disjoint ».

L'approche exploratoire que nous entretenons dans ce travail collectif sert

20. On parle alors d'*Exploratory Data Analysis* ou « EDA », d'après TUKEY (1977).

21. *Exploratory Spatial Data Analysis*, « ESDA », d'après BRUNSDON (1998) et HAINING, WISE et MA (1998).

22. On retrouve notamment cette approche, de manière très interactive, dans le champ des *geovisual analytics* (ANDRIENKO et ANDRIENKO 2006).

ainsi, en favorisant l'abduction, d'interface entre les disciplines. Elle permet d'oublier, par moments, les *a priori* disciplinaires sur les causes de tel ou tel processus spatio-temporel, pour en proposer de nouvelles interprétations issues du modèle, de son exploration, et des discussions collectives entretenues autour de cette exploration.

1.4.3 Démarche exploratoire

Dans la dernière sous-partie, je mentionnais l'intérêt d'une démarche exploratoire en ce qu'elle favorise l'abduction et donc l'interdisciplinarité. De manière plus générale, l'approche exploratoire est essentielle au raisonnement tenu tout au long de ce travail de thèse. Elle est ainsi mobilisée dans chacune des étapes de co-construction et d'évaluation de SimFeodal, et constitue dans chacune de ces étapes l'approche principalement suivie. Dans cette dernière partie de définition du positionnement de ce travail de thèse, il me paraît important de revenir sur la manière dont cette démarche exploratoire s'exprime dans cette expérience de modélisation interdisciplinaire.

Un modèle exploratoire. Les archéologues, en particulier dans le monde anglophone, font emploi de la simulation informatique depuis le début des années 1970. Parmi les chercheurs qui ont cherché à en décrire et à en catégoriser les usages, MITHEN propose une typologie des modèles de simulation selon les buts qu'ils servent. Il distingue trois types de modèles de simulation, selon²³ :

1. qu'ils servent à tester des hypothèses ;
2. qu'ils aient pour but d'accompagner la construction théorique ;
3. qu'ils soient conçus pour épauler le développement de nouvelles méthodes.

Dans la citation suivante, LAKE donne une définition des deux premiers types, qui nous semblent mieux convenir à l'usage recherché pour le modèle SimFeodal :

« When simulation models are used to test hypotheses the aim is usually to determine what actually happened in the past by comparing the output of a simulated process against the archaeological evidence. In contrast, the use of simulation models to support theory building – so-called heuristic modelling – does not necessarily, or even usually, involve detailed comparison of output against the archaeological record; in this case the purpose is not to test what happened in the past, but rather to understand how certain processes work and what sort of changes could plausibly have occurred.

[...]

[It] is important to recognise that the distinction between hypothesis-testing and theory-building simulation as conceived by Mithen is not always so clear cut in practice. »

LAKE 2014, p. 260

23. MITHEN (2018, pp. 176–177; cité par LAKE 2014, p. 260).

À mon sens, SimFeodal s'inscrit précisément dans le cas identifié où la distinction entre ces deux approches n'est pas tranchée. La conception du modèle s'appuie ainsi autant sur des théories que sur des données empiriques, en un continuum que nous appelons « connaissance experte ». Il s'agit bien de tester des hypothèses, mais sans nécessairement comparer les sorties du modèle à des données empiriques très lacunaires et hétérogènes.

L'usage principal du modèle est donc expérimental : on cherche tant à explorer les résultats d'interactions complexes entre agents, entre comportements, qu'à expérimenter les structures et processus que le modèle en fait émerger, potentiellement sous l'influence de « scénarios thématiques ». Finalement, le modèle sert surtout le rôle de support de dialogue, collectif et interdisciplinaire, mais il permet aussi, individuellement, pour chacun des participants, de repenser ou réorganiser la compréhension de la transition et des processus spatiaux modélisés. En cela, c'est l'expérience de modélisation de SimFeodal, plus encore que le modèle en lui-même, qui se révèle intrinsèquement exploratoire.

Construit de manière exploratoire. La manière dont SimFeodal a été conçu, implémenté puis paramétré, pourrait sembler proche du « bricolage » à certains modélisateurs chevronnés. Par exemple, le fait que certains mécanismes et indicateurs de sortie de simulation aient évolué au cours de la vie du modèle peut sembler caractéristique d'un modèle conceptuel défectueux ou incomplètement conçu.

Je souhaite au contraire défendre ce choix de modélisation, dans lequel prennent les itérations entre le modèle, les résultats qu'il produit et les connaissances expertes sur lesquelles il s'appuie. Ce mode de développement, où tout élément du modèle implémenté peut être amené à évoluer, faisant alors évoluer l'élément équivalent dans le modèle conceptuel, permet au fur et à mesure de consolider ou d'invalider la représentation que l'on a du système modélisé.

Cela rend la démarche de construction de SimFeodal profondément exploratoire : dans une construction « en spirale » (MATHIAN et SANDERS 2014, p. 157), ce sont les connaissances acquises au travers de la modélisation qui guident la suite du processus de modélisation, et non directement les données empiriques ou la théorie initiale. SimFeodal est donc un modèle que l'on pourrait qualifier d'« auto-construit » – en référence à l'auto-organisation –, l'expérience exploratoire de sa construction influant sur sa forme finale de manière performative.

Évalué et analysé de manière exploratoire. De manière plus classique, l'approche exploratoire est enfin appliquée aux données de sortie du modèle, selon le cadre méthodologique déjà mentionné de l'analyse exploratoire de données (EDA).

Les indicateurs de sortie sur lesquels on se base pour évaluer le modèle sont eux aussi très classiques, mais le choix de faire reposer l'évaluation uniquement sur l'analyse visuelle de ces indicateurs me semble quant à elle assez hétérodoxe. L'approche proposée dans cette thèse, nommée « évaluation vi-

suelle » (ref vers chapitre 3), contrevient en effet à l'approche classique où la visualisation n'est mobilisée qu'au début du processus d'évaluation, lors de la phase de « *face validation* ».

De manière globale, c'est toute l'exploration du modèle qui a été menée de manière visuelle, en faisant appel à une plateforme – SimEDB – qui a fortement évolué tout au long de cette recherche. Les « résultats » du modèle, de même que sa sensibilité, n'ont pas été analysés au crible d'objectifs pré-définis stricts et hiérarchisés : les critères de ces évaluations qui sont finalement présentés dans ce manuscrit résultent de nombreux allers-retours entre thématiciens et modélisateurs, et d'encore plus nombreux allers-retours entre le modèle et l'exploration de ses sorties.

Conclusion intermédiaire de la partie 1.4

1.4.4 Démarche reproductible

Conclusion

- Je ne suis pas une interface
- Je construis des interfaces
- innovation pas dans les bases sur lesquelles ces interfaces reposent, mais dans leur mobilisation à cet effet
- Position de passeur

2

Formaliser connaissances et hypothèses, vers un modèle de simulation co-construit : SimFeodal

Version 2019-10-30

- 04/2019 : Nouveau départ pour le chapitre
- 20/05/2019 : Reprise commentaires Lena
- 28/06/2019 : Rendu à Lena des reprises de Intro à 2.4 (concepts de modélisation)
- 05/07/2019 : Rendu à Lena de 2.4 et 2.5
- 08/07/2019 : fin reprise (->2.7.2.3 inclus) + envoi doc à Lena
- 26/10/2019 : début dernières reprises Lena
- 29/10/2019 : rédaction parties manquantes
- 30/10/2019 : dernière relecture + envoi à Thomas & Julie

Sommaire

Introduction	11
1.1 D'où je viens	11
1.2 Contexte d'inscription du travail	17
1.3 Questionnement initial, obstacles et pistes de résolution	25
1.4 Un positionnement résolument interdisciplinaire, facilité par la conception d'interfaces exploratoires	30
Conclusion	38

Avant-propos

Le présent chapitre décrit un modèle, SimFeodal, qui est une œuvre profondément collective et interdisciplinaire. La paternité de ce modèle est ainsi à attribuer à l'auteur de ces lignes autant qu'à l'ensemble des co-concepteurs du modèle :

- Cécile TANNIER, UMR 6049 ThéMA – Besançon
Géographe et modélisatrice, Directrice de Recherche, CNRS
- Samuel LETURCQ, UMR 7324 CITERES-LAT – Tours
Historien, Maître de Conférence, Université François Rabelais
- Élisabeth ZADORA-RIO, UMR 7324 CITERES-LAT – Tours
Archéologue, Directrice de Recherche émérite, CNRS

Ainsi qu'à ceux qui ont contribué au projet pendant ses premières années :

- Élisabeth LORANS, UMR 7324 CITERES-LAT – Tours
Archéologue, Professeure, Université François-Rabelais
- Xavier RODIER, UMR 7324 CITERES-LAT – Tours
Archéologue, Ingénieur de Recherche HDR, CNRS

Ce chapitre de thèse constitue une reprise, individuelle et largement modifiée et retravaillée, d'un chapitre¹ de l'ouvrage collectif « Peupler la terre » (SANDERS 2017) issu du projet TransMonDyn².

Dans ce chapitre, SimFeodal est présenté dans une version différente (v6.3) de celle de l'ouvrage collectif (v3.1), et de nombreux mécanismes sont considérablement simplifiés. En matière de forme, notons que contrairement au chapitre d'ouvrage et aux parties traitant du modèle dans l'HDR de Cécile TANNIER (TANNIER 2017), le modèle SimFeodal est ici présenté en suivant le protocole de description « ODD » (*Overview, Design concepts, and Details*) (GRIMM et al. 2010), dans sa formulation la plus récente (GRIMM, POLHILL et TOUZA 2017, voir tableau 2.1).

SimFeodal ne se prête pas à toutes les catégories identifiées par les auteurs de ce standard, et celui-ci n'est de plus pas pensé pour une description aussi détaillée du modèle. Nous pensons tout de même que le suivi de ce protocole de description permettra d'accroître la reproductibilité de SimFeodal. Pour cette même raison, notons que l'implémentation du modèle, son historique ainsi que les différentes descriptions techniques sont disponibles dans le dépôt de versionnement de SimFeodal :

<https://github.com/SimFeodal/SimFeodal>

1. Le chapitre 11, « Transition 8 : 800-1100. Fixation, Polarisation et Hiérarchisation de l'habitat Rural En Europe Du Nord-Ouest », (CURA et al. 2017b)

2. Projet ANR (ANR-10-BLAN-1805), coordonné par Lena SANDERS, entre 2011 et 2014.
www.transmondyn.parisgeo.cnrs.fr

Chapitre 2

Overview	1. Purpose	What is the purpose of the model ?
Design concepts	2. Entities, state variables, and scales	What kind of entities are in the model? Do they represent managers, voters, landowners, firms or something else? By what state variables (attributes or characteristics), are these entities characterized? What are the temporal and spatial resolutions and extents of the model?
	3. Process overview and scheduling	What entity does what, in what order? When are state variables updated? How is time modeled: as discrete steps or as a continuum over which both continuous processes and discrete events can occur?
	4. Design concepts	Basic principles
	Emergence	Which general concepts, theories or hypotheses are included in the model's design? How were they taken into account?
	Adaptation	What key results are emerging from the adaptive traits, or behaviors of individuals? What results vary in complex/unpredictable ways when particular characteristics change?
	Objectives	What adaptive traits do the individuals have? What rules do they have for making decisions or changing behaviour in response to changes in themselves or their environment? Do agents seek to increase some measure of success or do they reproduce observed behaviours that they perceive as successful?
	Learning	If agents (or groups) are explicitly programmed to meet some objective, what exactly is that and how is it measured? When individuals make decisions by ranking alternatives, what criteria do they use?
	Prediction	May individuals change their adaptive traits over time as a consequence of their experience? If so, how?
	Sensing	Prediction can be part of decision-making; if an agent's learning procedures are based on estimating future consequences of decisions, how they do this? What internal models do agents use to estimate future conditions or consequences? What 'tacit' predictions are implied in these internal model's assumptions?
	Interaction	What aspects are individuals assumed to sense and consider? What aspects of which other entities can an individual perceive (e.g. displayed 'signals')? Is sensing local, through networks or global? Are the mechanisms by which agents obtain information modeled explicitly in a process or is it simply 'known'?
Details	Stochasticity	What kinds of interactions among agents are assumed? Are there direct interactions where individuals encounter and affect others, or are interactions indirect, e.g. via competition for a mediating resource? If the interactions involve communication, how are such communications represented?
	Collectives	What processes are modeled by assuming they are random or partly random? Is stochasticity used, for example, to reproduce variability in processes for which it is unimportant to model the actual causes of the variability, or to cause model events or behaviours to occur with a specified frequency?
	Observation	Do the individuals form or belong to aggregations that affect, and are affected by, the individuals? Such collectives can be an important intermediate level of organization. How are collectives represented – as emergent properties of the individuals or as a separate kind of entity with its own state variables and traits?
	5. Initialisation	What data are collected from the ABM for testing, understanding, and analyzing it, and how are they collected?
	6. Input data	What is the initial state of the model world, i.e., at time $t = 0$? How many entities of what type are there initially, and what are the values of their state variables (or how were they set)? Is initialization always the same, or is it varied? Are the initial values chosen arbitrarily or based on available data?
	7. Submodels	Does the model use input from external sources such as data files or other models to represent processes that change over time?
		What are the submodels that represent the processes listed in 'process overview and scheduling'? What are the model parameters, their dimensions, and reference values? How were submodels designed or chosen, tested, and parameterised?

TABLEAU 2.1 – Les éléments du protocole ODD, d'après GRIMM, POLHILL et TOUZA (2017, Table 15.1, pp. 353–354).

Introduction

Le chapitre précédent ([ref chap 1](#)) visait à présenter le positionnement de cette thèse, entre géographie, modélisation et informatique. Ce positionnement, pleinement ancré dans une approche méthodologique plus que thématique, met notamment en avant la construction d'une démarche complète de co-construction de modèle. Cette démarche sera mobilisée et commentée de manière systématique tout au long des chapitres à venir. Dans un premier temps, et avant de pouvoir commenter véritablement la méthode de construction, d'évaluation et de paramétrage d'un modèle, il est nécessaire de décrire le cas d'étude. Celui-ci permettra notamment d'illustrer et d'exemplifier, dans les chapitres suivants, les raisonnements et démarches de modélisation qui sont empruntés. Dans ce chapitre, nous présentons donc de manière détaillée le modèle de simulation auquel notre groupe (voir l'avant-propos) a abouti.

Ce modèle s'intitule SimFeodal, acronyme à peine forcé de « **S**imulation de la **F**ixation, de l'**É**mergence et de l'**O**rganisation **D**ynamique d'Agrégats de population **L**ocalisés ». Nous reviendrons dans les pages suivantes sur les objectifs poursuivis par la réalisation de ce modèle.

Dans un premier temps, on peut adresser une remarque au lecteur qui nous semble importante pour la compréhension de ce chapitre : SimFeodal est le résultat d'une expérience, innovante, de modélisation collaborative en contexte interdisciplinaire. Le processus de modélisation poursuivi est très fortement exploratoire, et n'a en aucun cas été prévisible ou linéaire tout au long des plus de 6 ans de conception. La seule ligne directrice, relative aux concepts de modélisation, qui a été tenue durant ces années est la volonté d'inscrire la modélisation des phénomènes spatio-temporels considérés dans une approche descriptive, respectueuse du niveau de généralisation auquel consentaient les thématiciens du groupe. Ces choix ancrent SimFeodal dans une approche « KIDS » (EDMONDS et MOSS 2005), caractérisée par une modélisation initialement détaillée, que l'on cherche à rendre plus parcimonieuse seulement dans un second temps ([voir chapitre 1](#)). Ce type de modélisation permet de ne brusquer aucun des co-concepteurs du modèle, en épargnant en particulier aux experts thématiques de mener des généralisations hâtives, sans ancrages empirique, qui ne peuvent que nuire à la qualité du modèle, tant du point de vue méthodologique que thématique.

Il résulte de cette démarche exploratoire un modèle fonctionnel et satisfaisant du point de vue de ses concepteurs : on reviendra dans le [chapitre 7](#) sur les réponses qu'il a apportées d'un point de vue thématique. Ce modèle, de type « KIDS », n'est ni épuré ni parcimonieux et les différentes parties qui le constituent (agents, initialisation, mécanismes, sorties...) sont en effet caractérisées par une forte hétérogénéité dans le niveau de généralisation. L'enjeu a effectivement été de tenir compte des connaissances thématiques de la manière la plus complète et riche possible, et de ce fait, il serait plutôt nécessaire de parler de niveaux de généralisation, au pluriel, tant ceux-ci peuvent varier. Comme indiqué dans le [chapitre 1](#), les experts thématiques sont ainsi chacun spécialistes de tel ou tel aspect du modèle (lignages seigneuriaux, communautés...),

aspect qui seront alors modélisés de manière plus fine et détaillée.

Au delà de la combinaison de démarches incrémentales et itératives³ qui rend difficile la formation d'un produit fini entièrement homogène, il faut noter un aspect important de SimFeodal : ce modèle existe et évolue depuis des années. C'est vrai aussi bien que l'on prenne en considération le premier diagramme conceptuel (entrepris il y a plus de 8 ans, en 2011, sans l'auteur de cette thèse), que le modèle implémenté, dont le premier *commit*, c'est-à-dire la première version fonctionnelle, remonte au mois d'avril 2014⁴. On présente, dans ce chapitre, la version « 6.3 » du modèle⁵, ce qui donne une idée du nombre d'itérations et de modifications de SimFeodal depuis l'établissement des mécanismes d'ensemble qui marquent le début de son existence.

En conclusion de cette introduction, et avant de reprendre le fil de la description de SimFeodal en suivant le protocole ODD, on notera que cette version 6.3 n'est vraisemblablement pas la dernière. SimFeodal a une existence propre, au sein du groupe de travail présenté dans l'avant-propos, qui dépasse fortement celle de la présente thèse. Que le lecteur ne s'étonne donc pas de trouver des descriptions différentes de ce modèle, qu'elles soient antérieures ou postérieures au présent ouvrage. On ne présente ici qu'un état, temporaire, de ce projet de longue haleine qu'est la co-construction de SimFeodal.

2.1 Objectif du modèle SimFeodal – *Purpose*

Le contexte de réalisation du modèle SimFeodal a été présenté dans le **chapitre 1, partie contexte TransMonDyn**, de même qu'une première description, brève, des processus sociaux et spatiaux qu'on cherche à reproduire dans le modèle (**chapitre 1, « Identifier des régimes et transitions »**).

Dans cette partie, il nous semble important de mettre en avant l'aspect thématique du modèle, c'est-à-dire aussi bien les questions qu'il cherche à adresser que le contexte historiographique dans lequel ces questions s'inscrivent.

2.1.1 Contexte historiographique

Le contexte historique et historiographique auquel prend part le modèle SimFeodal est riche et très étudié par les médiévistes. Il dessine les contours d'un paysage scientifique, entre histoire et archéologie, qui cherche à comprendre les origines du féodalisme et les changements que ce système a provoqué autour de l'« An Mil » (DUBY 1967).

Plutôt que de mener un exercice d'« auto-paraphrase », nous préférons ici mobiliser un texte collectif (encadré 2.1), publié par les auteurs de SimFeodal (CURA et al. 2017b, Introduction du chapitre). Le pan historiographique relève en effet plutôt des connaissances expertes thématiques, et à ce titre, n'aurait

3. Reprendre l'encadré du chapitre du manuel, peut-être dans le chapitre 1 ou 3

4. <https://github.com/SimFeodal/SimFeodal/commit/a8559868>

5. Renvoyer au chapitre 4 sur tableau des versions.

pas véritablement de sens à être ré-écrit par l'unique auteur de cette thèse. Procéder à une citation, même aussi longue, permet de garantir la justesse de la description de ce contexte historiographique, et en assure de plus une validation par les co-auteurs, notamment thématiciens, de ce chapitre d'ouvrage.

Encadré 2.1 : Un modèle inscrit dans un vif débat historiographique

« La question de l'émergence de la société féodale en Occident est au cœur d'un débat historique ancien. Depuis le XVIII^e siècle, les penseurs cherchent à comprendre le fonctionnement de la société médiévale et à cerner ses fondements. Les archives sont continûment explorées pour comprendre isolément et précisément les multiples facteurs à l'œuvre dans les processus qui ont fait émerger une société dite « féodale » dans le courant des Xe-XI^e siècles. Cette compréhension se heurte toutefois à la très grande complexité de ces processus, qui peuvent varier chronologiquement, mais aussi présenter des nuances infinies en fonction des zones étudiées. Ces difficultés sont encore amplifiées par l'accès aux données, très variable selon l'état de la documentation, soumise aux aléas de la conservation [...] »

Depuis une quarantaine d'années, l'afflux massif de données de fouilles issues du développement de l'archéologie préventive a permis de renouveler et enrichir ces débats. [...] [La] complémentarité des approches textuelles et matérielles, loin de simplifier les questionnements portant sur la société féodale, les a encore complexifiés en mettant en évidence des aspects anthropologiques et des différenciations géographiques jusqu'alors sous-estimés. Le débat s'en est trouvé vivifié, se focalisant désormais sur la question de l'occupation de l'espace, considéré comme un marqueur efficace des transformations sociales. L'émiettement et la dissémination des pouvoirs, dont témoigne la multiplication des châteaux (seigneuries châtelaines), se font concomitamment à l'apparition d'un réseau très structuré d'encadrement religieux (paroissialisation de la société), tandis que se fixe de manière définitive un système de peuplement fondé sur un maillage villageois, cœur d'une vie communautaire active.

C'est autour de l'articulation de ces trois éléments fondamentaux de la société féodale (châteaux, églises paroissiales, villages) que portent aujourd'hui analyses et théories. Fixation, polarisation et hiérarchisation des centres de peuplement sont désormais les grands processus sociaux examinés à la loupe pour aborder la société médiévale. Les historiens médiévistes analysent l'« encellulement » de la société (FOSSIER 1982), pistant d'une part les rôles polarisateurs du château (phénomène d'*incastellamento*, TOUBERT 1973) et de l'église paroissiale accompagnée de son cimetière, considérés comme points de ralliement des populations paysannes, et d'autre part les manières dont les populations organisent collectivement les espaces de production (terroir villageois) pour assurer une répartition équilibrée des ressources.

Dans ce contexte, la période 800-1100 est habituellement considérée comme une période de transition, durant laquelle la société féodale se

structure, certains évoquant la « révolution de l'an Mil » (FOSSIER 1982), tandis que d'autres tempèrent en parlant de « révélation de l'an Mil » (BARTHÉLEMY 1993) (« révélation » par l'augmentation en quantité et en qualité de la documentation textuelle). Les hypothèses sont ainsi nombreuses, et il est difficile de trancher en faveur de l'une ou l'autre, tant l'articulation des facteurs sociaux, politiques, institutionnels, économiques et culturels est complexe. »

CURA et al. 2017b, p. 301-302

2.1.2 Questionnement

Dans ce contexte, nous avons cherché à étudier, avec une approche « résolument géographique » (CURA et al. 2017b, p. 302), les causes et conditions des processus spatiaux à l'œuvre durant cette période : polarisation, fixation, et hiérarchisation du système de peuplement rural. Les hypothèses qui sous-tendent notre approche modélisatrice sont multiples. On estime ainsi, d'après les connaissances expertes des thématiciens du projet, que ces processus spatiaux incombent à une triple dynamique sociale.

- Sur le plan des élites, la période est caractérisée par un émiettement des pouvoirs, en partie lié au démantèlement de l'empire carolingien. Cet émiettement s'exprime sous la forme de la « révolution féodale ». En résulte l'apparition ou l'accroissement d'un climat de violence, en particulier entre les seigneurs de même régions, matérialisation de la compétition qui émerge entre des seigneurs suite au tarissement des sources de richesse issues du pouvoir central et de son économie de razzia.
- Sur le plan spirituel, on assiste à l'émergence nette d'une structure de contrôle social, mise en place par l'Église chrétienne, qui institutionnalise des structures territoriales (les paroisses) permettant le décompte et la gestion des habitants.
- Sur le plan communautaire, enfin, on note l'apparition de différents types d'organisations locales (communautés paysannes, agraires, villageoises...), créées par et pour les populations, qui permettent la constitution de contre-pouvoirs face à des seigneurs féodaux de plus en plus exigeants.

À ces trois processus sociaux, on associe des conséquences sur le plan spatial : de la violence émerge le besoin de protection, d'où la création de châteaux et la concentration de la population rurale à proximité ; de l'encadrement religieux émerge une nette augmentation du devoir de fréquentation des églises, d'où la démultiplication des églises paroissiales et la polarisation de la population à leurs abords ; de l'apparition des communautés, en réaction notamment aux augmentations des droits et impôts causés par l'émiettement des pouvoirs, émerge un intérêt réel à la concentration des paysans dispersés.

En étudiant cette population à l'échelle d'une région, on cherche à éprouver la combinaison de ces hypothèses, en interrogeant leur capacité à expliquer à elles seules l'apparition de la structure spatiale polarisée (par les châteaux et

églises) et hiérarchisée (du petit village à la ville de portée nationale) que l'on constate à la fin de la période.

2.2 Entités et échelles – *Entities, state variables, and scales*

2.2.1 Entités

Dans le modèle SimFeodal, plusieurs types d'agents sont en interaction. Ces agents sont des implémentations informatiques des acteurs et entités identifiées dans le modèle conceptuel qui a donné lieu à SimFeodal (voir CURA et al. 2017b, Tableau 1, p. 309–310).

Au cœur du modèle, on trouve les **foyers paysans**⁶. Ces agents sont une représentation des familles paysannes médiévales et de leur foyer de résidence. Dans le modèle, l'agent représentant un foyer paysan peut perdurer de 800 à 1200, tout en changeant potentiellement de foyer de résidence à chaque pas de temps, celui-ci correspondant à une période de 20 ans. Les agents représentent ainsi plutôt des lignées que des familles au sens classique. Il s'agit ainsi de simuler les migrations résidentielles que peuvent traverser les générations successives de paysans d'une famille. Chaque foyer paysan est caractérisé par une *localisation* (leur lieu de résidence à un instant t), et par une *satisfaction* qui va déterminer sa propension à migrer.

La satisfaction d'un agent foyer paysan, et en conséquence son comportement migratoire, dépend de ses interactions avec les autres agents du modèle. Il aura une probabilité d'autant plus forte de migrer qu'il sera insatisfait, que ce soit sur le plan *matériel* ou celui de l'accessibilité à une pratique *religieuse* et à une *protection* en cas de conflit (voir figure 2.1-B).

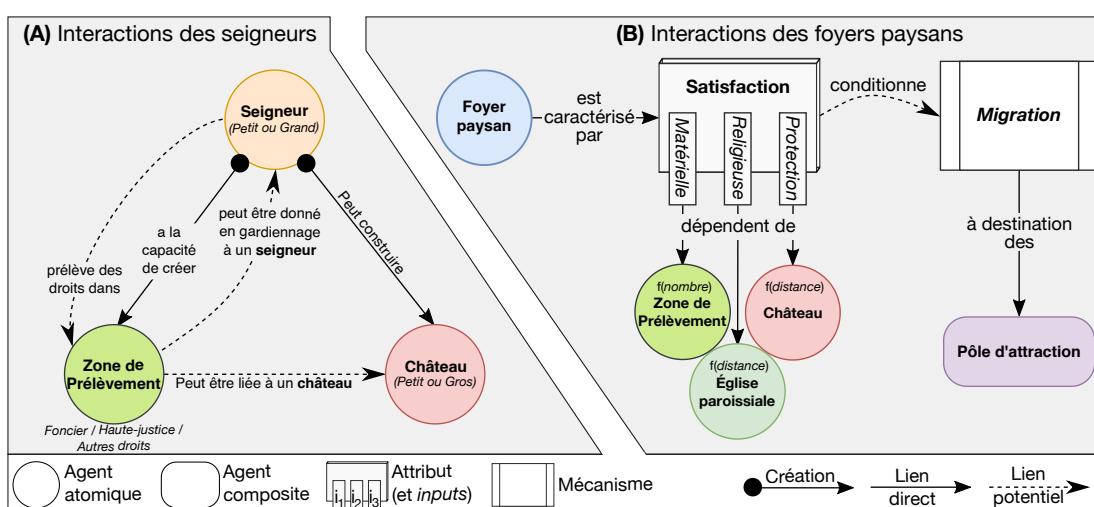


FIGURE 2.1 – Interactions des agents : seigneurs (A) et foyers paysans (B).

Les agents pouvant influencer le niveau de satisfaction ou d'insatisfaction des foyers paysans peuvent être catégorisés en cinq groupes, en fonction de

6. Dans cette sous-partie, les premières mentions des **agents**, de leurs *attributs* et de leurs *mécanismes* sont identifiées par cette mise en forme (gras, italique, souligné).

la nature de leur relation avec les foyers paysans. Les trois premiers sont liés à leur niveau de satisfaction, les deux derniers influent directement sur leur comportement migratoire :

- Les agents « **seigneurs** » et les agents « **zones de prélèvement** » : un foyer paysan doit s'acquitter de droits qui sont prélevés par des seigneurs, au sein de zones de prélèvement qu'ils créent. Ces zones sont une représentation spatiale des droits dont les agents-seigneurs disposent sur les agents-foyers paysans : *droits fonciers*, *droits de haute justice*, et *autres droits* (droits banaux, droits de basse justice etc.) (figure 2.1-A). En prélevant des droits, les seigneurs gagnent de la *puissance* et, à l'inverse, l'importance des droits prélevés influe sur l'insatisfaction matérielle des foyers paysans.
- Les agents « **églises** » et « **paroisses** » : les agents « églises » offrent aux foyers paysans les services religieux dont ils ont besoin. Certaines de ces églises ont acquis des *droits paroissiaux*, et ont le statut d'églises paroissiales, ce qui constitue une promotion (voir figure 2.3). La satisfaction religieuse des foyers paysans dépend alors de la distance à l'église paroissiale la plus proche (figure 2.1-B). Le territoire est maillé par des agents-paroisses, qui constituent le pendant surfacique des églises paroissiales et visent à desservir la population (figure 2.2-B).
- Les agents « **châteaux** » qui ont la capacité de protéger les foyers paysans face aux violences de l'époque (guerres, pillages, bandits...). La satisfaction relative à cette protection est mesurée en fonction de la distance au château le plus proche. Ces châteaux sont construits par les seigneurs tout au long de la simulation, en fonction de leur puissance.
- Les agents « **agrégats** de foyers paysans » : ces agrégats sont des agents « composites » (par opposition aux autres types d'agents, dénommés « atomiques » dans la figure 2.1) composés d'un ensemble suffisant (5) de foyers paysans situés à proximité les uns des autres (figure 2.3). Les agrégats sont des agents en tant que tel, composite puisque constitués par des foyers paysans, mais dotés de leurs propres attributs, telle que l'existence en leur sein d'une éventuelle *communauté paysanne*. L'agrégat n'a pas de pérennité propre : il émerge quand les migrations des foyers paysans débouchent sur des regroupements dans l'espace. Si les foyers paysans qui le composent migrent ailleurs à un des pas de temps suivants, l'agrégat ne perdure pas.
- Les agents « **pôles d'attraction** » : il s'agit ici encore d'agents composites, cette fois constitués d'un ou plusieurs **attracteurs**, c'est-à-dire des églises paroissiales, des châteaux ou des agrégats de foyers paysans (figure 2.2-A). C'est vers un tel pôle que se dirige le foyer paysan qui a pris la décision de migrer (figure 2.1-B).

Le tableau 2.2 résume les propriétés et caractéristiques des différents agents de SimFeodal.

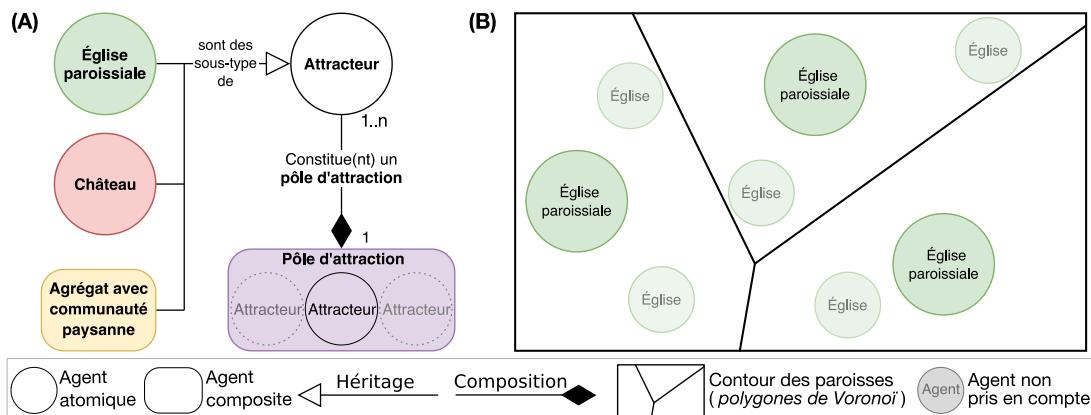


FIGURE 2.2 – Constitution des pôles d'attraction (A) et des paroisses (B).

Exemple de lecture : un pôle d'attraction est composé de 1 ou plusieurs attracteurs ; un attracteur peut être une église paroissiale, un château ou un agrégat contenant une communauté paysanne ; un pôle d'attraction est ainsi composé d'un ou plusieurs de ces agents.

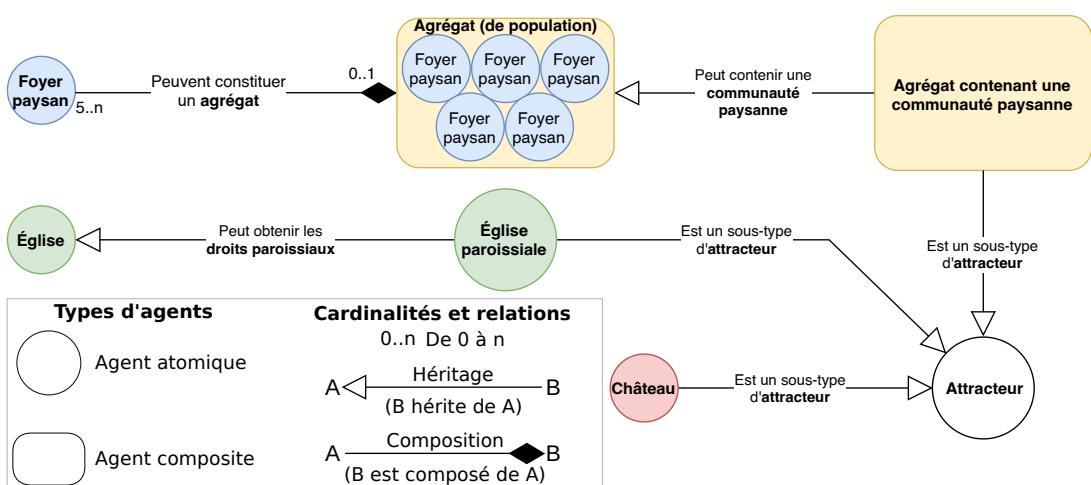


FIGURE 2.3 – Héritages et compositions des agents de SimFeodal.

Exemple de lecture :

- un agrégat est composé de 5 ou plus foyers paysans,
- un foyer paysan appartient à 0 ou 1 agrégat.

Agent	Sous-type	Quantité (en 1200)	Emprise spatiale ^α	Comportements actifs ^β
Foyers Paysans		≈ 4 000 à 75 000	Ponctuelle	Migrations
Seigneurs	Grands Seigneurs	≈ 2	—	Création de zones de prélèvement, collecte de droits, construction de châteaux
	Petits Seigneurs	≈ 200	Ponctuelle	
Zones de Prélèvement	Foncier	≈ 75	Zonale	—
	Haute-Justice	≈ 50		
	Autres droits	≈ 300		
Églises	Églises	≈ 300	Ponctuelle	—
	Églises paroissiales ^γ	≈ 200		Création de paroisse
Paroisses		≈ 200	Zonale	—
Châteaux ^γ	Petits Châteaux	≈ 40	Ponctuelle	—
	Gros Châteaux	≈ 10		—
Agrégats de population ^γ		≈ 200	Zonale	Création de communautés
Pôles d'attraction		≈ 300	Zonale	Attire les Foyers Paysans

TABLEAU 2.2 – Les différents types d'agents de SimFeodal.

α & β : *Les agents sans emprise spatiale (—) ne sont pas localisés dans l'espace du modèle ; Les agents sans comportement actifs (—) n'agissent pas en tant que tel, mais peuvent servir de support pour les actions d'autres agents.*

γ : *Ces agents sont aussi des types d'attracteurs, qui constituent des pôles d'attraction, voir figure 2.2-A.*

2.2.2 Échelles spatiales et temporelles

2.2.2.1 Résolution et échelle spatiale

SimFeodal prend appui sur un monde théorique **isotrope**, **continu**, symbolisé sous la forme d'un **carré de 80 km de côté**, strictement **endogène** au modèle, c'est-à-dire créé (et recréé) à chaque nouvelle simulation.

Le monde est **isotrope** car il ne présente aucune hétérogénéité de surface ou de topologie : la distance entre deux points est mesurée de manière euclidienne. Cet espace support se veut le plus neutre et générique possible. Il est ainsi susceptible de représenter un cas très général, qui peut servir de support à toute la diversité des espaces de l'Europe du Nord-Ouest, par l'entremise de ce dessin théorique.

Contrairement à un usage classique en simulation à base d'agents, nous avons aussi fait le choix de placer SimFeodal dans **un espace continu**, c'est-à-dire non discrétisé. La discréttisation de l'espace, sous forme de « patchs » ou de « cellules », s'inscrit souvent dans l'héritage des modèles à base d'automates cellulaires. Les *patchs* prennent d'ordinaire la forme d'agents : cela facilite l'attribution de caractéristiques, comme un certain niveau de ressource, une altitude, une population agrégée etc. Dans le cas de SimFeodal, l'espace n'est qu'un support : il ne possède aucune caractéristique propre, et de par sa nature isotropique, il n'est pas utile d'y d'éventuelles cellules les unes des autres. Une large part des mécanismes de SimFeodal s'appuie sur la prise en compte de distances entre agents, à partir de seuils dont les ordres de grandeurs peuvent être très variables (de la centaine de mètres à plus de 10 km). Nous avons donc préféré conserver une marge de manœuvre élargie en ne procédant pas à une discréttisation de l'espace.

L'espace est formalisé sous la forme d'**un carré de 80 km de côté**. Le choix du carré s'inscrit dans la volonté d'isotropie, et l'espace ainsi défini est proche de l'ordre de grandeur des diocèses médiévaux. Dans des versions précédentes de SimFeodal, le carré avait un côté de 100 km. Nous avons choisi de le réduire afin d'approcher de la superficie de la Touraine médiévale sur laquelle nous prenons appui pour le calibrage du modèle. La superficie du département d'Indre-et-Loire actuel, ou encore du diocèse de Tours, sont ainsi d'environ 6 000 km². En choisissant un espace support de 80×80 km de superficie (6400 km²), on facilite l'estimation des densités et mesures d'écartements dans le modèle au regard des connaissances empiriques. Notons enfin que si l'espace support est bien un carré de 80 km de côté, on en retranche en réalité une partie (1 km de chaque côté, voir figure 2.4) pour définir un espace utile, ou « **espace actif** ». On s'assure ainsi qu'aucune localisation ne soit située trop proche des limites de l'espace, ce qui pourrait avoir pour effet de produire des « **effets de bords** », aussi bien informatiques qu'en termes d'anomalies de voisinages. L'espace actif, utilisable dans le modèle, est alors de 79×79 km, soit 6 084 km².

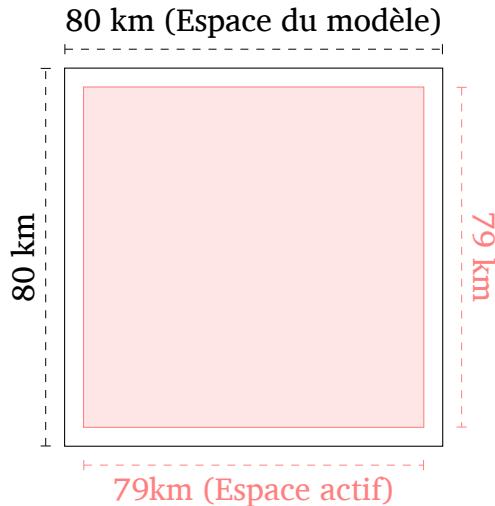


FIGURE 2.4 – L'espace support de SimFeodal, un monde théorique.

N.B : Dans le schéma, pour une question de lisibilité, les dimensions de l'espace réduit ne sont pas proportionnelles à celles de l'espace d'ensemble.

Notons enfin que l'espace est strictement **endogène** au modèle. On entend par là que le monde simulé ne résulte pas d'un *input*⁷ : seul un paramètre, qui régit la taille des côtés, joue sur la géométrie globale de l'espace. Les agents sont en effet placés, à l'échelle de l'individu, de manière quasi-aléatoire dans l'espace du modèle. Cet aléa est toutefois contrôlé à l'échelle du système : la structure d'ensemble du peuplement répond à des caractéristiques choisies et paramétrées. Cette localisation des agents doit répondre à une double contrainte :

- Au niveau des agents, la distribution spatiale doit être aléatoire, afin que les différentes situations spatiales générées présentent une large diversité. Cette diversité, éprouvée par l'exécution de nombreuses réplications du modèle, est garante de la générnicité du modèle.
- Au niveau global, la structure du système de peuplement généré doit être partiellement configurable, c'est-à-dire répondre à certains paramètres macroscopiques qui agiront non sur la localisation individuelle des agents, mais sur leur degré de concentration ou de dispersion dans l'ensemble de l'espace « actif ».

2.2.2.2 Granularité temporelle

SimFeodal modélise des processus qui se déroulent sur le temps long, et à ce titre, la gestion de la temporalité est importante. Le modèle inscrit son exécution dans une étendue de **400 ans**, discrétisée sous la forme de 20 pas de temps de **20 ans** chacun.

La période d'étude, thématique, s'étend entre 800 après J.-C. et 1100, qui correspondent à des repères temporels entre lesquels on estime que la transition s'est déroulée (section 2.1.1). Pour modéliser ces évolutions, nous avons choisi

7. Contrairement à de nombreux modèles utilisés en géographie (WHITE, ENGELEN et ULJEE 1997; WHITE et ENGELEN 2000; DUBOS-PAILLARD, GUERMOND et LANGLOIS 2003; BENENSON, HATNA et OR 2009, etc.), il n'y a pas de chargement de configurations initiales dans SimFeodal : la génération de l'espace support est un sous-modèle dans le modèle.

de commencer à la même date, mais de prolonger l'exécution du modèle d'un siècle, portant l'intervalle modélisé à **400 ans, de 800 à 1200**⁸. Prolonger cette date d'observation des résultats du modèle permet d'analyser le comportement du modèle après la période même de transition , à une date où le système est pleinement inscrit dans son régime post-transition (régime 2 -cf. chap1, contexte, transitions et régimes). On peut ainsi, entre autre, voir si les processus à l'œuvre subissent bien un ralentissement, marquant par exemple la fin de la féodalité, plutôt qu'un accroissement constant.

Contrairement à la gestion de l'espace, nous avons choisi de modéliser le temps sous forme **discrète**. On peut justifier ce choix avec deux raisons principales. En premier lieu, la transition s'inscrit dans une forte incertitude temporelle. Les experts thématiciens peuvent certes s'appuyer sur des dates précises, par exemple pour des années de réformes, mais les processus à l'œuvre s'inscrivent dans une durée floue. Le niveau de résolution temporel de ces processus est difficilement réductible à moins d'un demi-siècle, et à peine meilleure pour les éléments matériels. Une vision continue du temps s'inscrirait ainsi dans une certaine sur-détermination du modèle en rapport aux connaissances thématiques sur lesquelles il s'appuie. En second lieu, les processus sont modélisés à un niveau de résolution correspondant à celui des « foyers paysans », c'est-à-dire à l'échelle de foyers plus que d'individus. Les migrations des foyers paysans correspondent empiriquement plutôt à des déplacements qui surviennent à l'échelle temporelle de la génération. Cela signifie que ces migrations se réalisent en fait quand les descendants d'un foyer sont en âge de s'établir dans une nouvelle localisation. La prise en compte d'un temps continu impliquerait la mise en place de bien plus de mécanismes probabilistiques, avec des aberrations potentielles plus importantes en termes de trajectoires des agents.

L'inscription thématique du mécanisme de migration oriente le choix de la granularité du modèle. **Les pas de temps ont une durée de 20 ans**, ce qui correspond à peu près à la durée d'une génération à l'époque, c'est-à-dire à l'âge auquel les individus sont en mesure de se marier et de fonder un noyau familial différent de celui de leurs descendants. Cela correspond aussi à la précision globale que l'on peut avoir sur l'apparition d'éléments matériels tels que les églises, paroisses et châteaux⁹. Dans l'ensemble, au vu des connaissances historiques, ces pas de temps doivent être interprétés comme des repères temporels plus que comme des dates précises. Que les premiers châteaux apparaissent en 980 ou en 1000 n'a pas d'importance dans le modèle, tant que cela se déroule avant le milieu du XI^e siècle par exemple.

La figure 2.5 illustre les processus et événements qui surviennent pendant

8. Dans les versions précédentes de SimFeodal, (par exemple dans CURA et al. (2017b) notamment), cette date était fixée à 1160. Nous avons choisi de prolonger de 40 ans parce que cela nous permet de comparer l'état final du modèle au début du XIII^e siècle. On obtient de plus un nombre de pas de temps plus « rond » (20) qu'auparavant (18), ce qui permet par exemple de représenter l'évolution d'une simulation de manière plus régulière.

9. Certains de ces éléments sont connus avec une précision bien supérieure, par exemple quand des textes historiques mentionnent leur création. Ce n'est toutefois pas généralisé, et la granularité moyenne gravite plutôt autour de 20 à 40 ans.

l'ensemble de cette période. Elle donne à voir la correspondance floue entre les événements historiques, précis ou non, et leur implémentation dans SimFeodal. Cette dernière peut ainsi prendre la forme de changements datés (par exemple le début du mécanisme de don de châteaux), ou au contraire de mises en place graduelles de mécanismes (par exemple les gains de droits de haute justice par les grands seigneurs, qui sont progressifs).

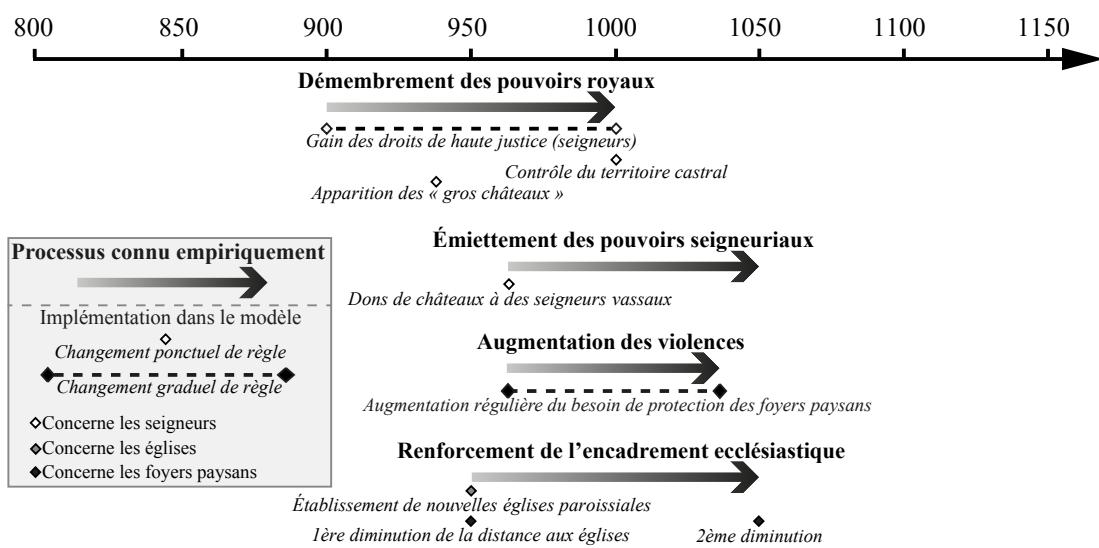


FIGURE 2.5 – Frise chronologique des processus historiques observés en Touraine im- plémentés dans SimFeodal.

Figure issue de Peupler la Terre, à corriger/adAPTER.

2.3 Fonctionnement général – *Process overview and scheduling*

SimFeodal est un modèle qui s'inscrit plutôt dans une approche KIDS que KISS (voir chapitre 1). Il est constitué d'une large variété d'agents (tableau 2.2), dotés pour certains de nombreux comportements. Au total, ce sont près de quarante mécanismes particuliers (ici regroupés en une quinzaine de mécanismes généraux) qui font interagir les agents à chaque pas de temps. Dans cette partie, nous présentons une synthèse de ces mécanismes, sans entrer dans le détail, algorithmique ou mathématique, de chacun (voir la section 2.7 pour des descriptions plus précises des mécanismes les plus complexes et importants).

Par ailleurs, afin de bien distinguer ce qui relève du domaine empirique, avec les connaissances thématiques qui y sont associées, et ce qui relève du domaine du modèle et des choix de modélisation qui y sont opérés, les descriptions et commentaires associés à chacun de ces domaines apparaissent de manière différenciée dans le texte. Les premiers sont présentés dans un format classique, les secondes sont encadrés en grisé.

Notons enfin que dans le cas des « mécanismes globaux »¹⁰ et de certains mécanismes très techniques (mise à jour des agrégats ou des pôles par

10. C'est-à-dire les mécanismes ne correspondant pas à des « réflexes » ou actions des agents, mais qui servent à modifier l'état « global » du modèle. Par exemple, l'initialisation du monde simulé est un processus global : ce n'est pas un agent qui, par son comportement, va créer le monde simulé, mais un mécanisme global qui suit une logique procédurale programmée par le modélisateur.

exemple), la description des mécanismes ne s'appuiera pas sur une description empirique : ce sont des contraintes et choix propres à la description du monde – et de ses caractéristiques spatiales – dans lequel les agents interagissent. Certains de ces mécanismes peuvent être guidés par les connaissances expertes, et c'est alors précisé, mais ils peuvent aussi remplir un rôle purement technique (enregistrement des *outputs* par exemple), qui est nécessaire au bon fonctionnement du modèle mais n'a pas d'inscription ou de correspondance empirique.

Ordonnancement général

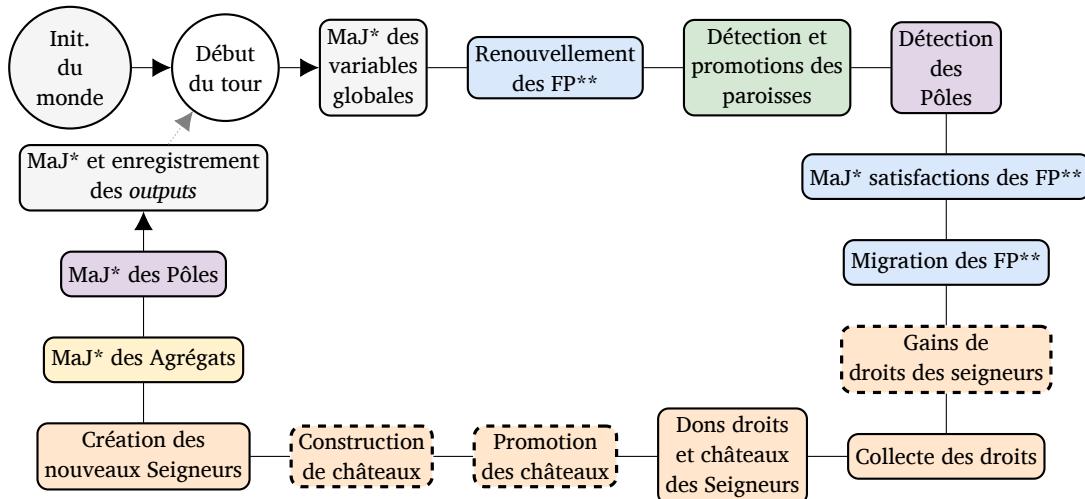


FIGURE 2.6 – Ordonnancement des mécanismes de SimFeodal.

Mécanisme global Foyers Paysans Églises Agrégats Pôles Seigneurs Temporaire

MaJ* : « Mise à jour » ; FP** : « Foyers paysans »

Dans SimFeodal, les mécanismes sont toujours appelés dans le même ordre (voir figure 2.6) : l'ordonnancement ne change pas tout au long des 20 pas de temps du modèle. Certains mécanismes sont toutefois temporaires, c'est-à-dire rendus inactifs en fonction des pas de temps : la construction des châteaux, par exemple, n'est pas possible avant 940. Jusqu'au pas de temps correspondant, le mécanisme est alors désactivé par un paramètre réglable. Notons que si les mécanismes suivent un ordre déterminé, ce n'est pas le cas des agents qui y sont associés. Pour un mécanisme donné, l'ordre d'appel des agents est aléatoire et varie à chaque appel de ce mécanisme.

2.3.1 Initialisation

L'étape d'initialisation du « monde » simulé consiste à créer l'espace théorique dans lequel les agents vont interagir, et à générer ces derniers. Il s'agit ainsi de créer les églises, paroissiales ou non, de localiser les seigneurs et surtout les foyers paysans. Ceux-ci, empiriquement, sont majoritairement dispersés dans la région d'étude, mais aussi regroupés localement, au sein de villages et d'agglomérations secondaires antiques.

Pendant cette étape, des foyers paysans sont générés et localisés dans l'espace du modèle. Comme indiqué dans la section 2.2.2.1, cette localisation des foyers paysans doit répondre à une double contrainte : aléatoire loca-

lement, mais organisée selon une structure macrogéographique prédefinie. Pour que ces deux contraintes potentiellement contradictoires soient respectées, les agents sont très majoritairement localisés de manière aléatoire, mais certains sont répartis « par groupe » dans le monde simulé. La localisation de ces groupes est aléatoire, mais leurs propriétés (nombre de foyers paysans par exemple) dépendent de paramètres du modèle (voir (section 2.5)).

Quelques dizaines d'agents sont ainsi localisés de manière agrégée afin de constituer les premiers agrégats de population, de tailles variables (une vingtaine de villages peu peuplés et quelques petites villes plus importantes, correspondant aux agglomérations secondaires antiques). Lors de l'initialisation sont aussi créés les premiers seigneurs – grands seigneurs sans portée spatiale et petits seigneurs localisés aléatoirement dans l'espace – et les zones de prélèvement dans lesquelles ils prélèveront des droits divers. Ces zones de prélèvement sont matérialisées sous formes de cercles de rayons variables, dont le centre correspond à la localisation des seigneurs qui les créent. Dès le départ de la simulation, l'espace support constitue ainsi une contrainte pour les foyers paysans qui se verront prélever des droits dans ces zones. L'initialisation est enfin l'occasion de créer et de disperser dans l'espace des églises (150). Parmi celles-ci, quelques-unes (50), choisies suivant un tirage aléatoire, se verront dotées de droits paroissiaux. Ces églises paroissiales constitueront alors le semis autour duquel sera organisé le premier maillage paroissial.

2.3.2 Variables globales

Plusieurs mécanismes de SimFeodal évoluent au cours du temps, c'est-à-dire changent de mode de fonctionnement d'une période à l'autre. Telle est la possibilité, évoquée plus haut, pour les seigneurs de construire un château, mais aussi, entre autre, l'évolution des distances que les foyers paysans sont prêts à parcourir pour se rendre à l'église, ce qui permet de formaliser l'impact des réformes grégoriennes. La mise en place de mécanismes tributaires de dates nous permet ainsi de représenter des événements exogènes (voir chap 1) au modèle, qui peuvent ainsi servir de déclencheurs ou de catalyseurs à des processus de longue durée. L'incrémentation de la date et la mise à jour des différentes variables temporelles (si l'année est supérieure à 940, la variable permettant la construction de château passe de l'état faux à l'état vrai par exemple) constituent donc la première étape de chaque nouvelle itération du modèle.

2.3.3 Renouvellement des foyers paysans

SimFeodal est un modèle qui simule l'évolution d'un système spatial clôt. On entend par là qu'il n'y a pas d'échange ou d'interaction avec les régions voisines, situées hors du carré qui tient lieu de monde simulé, ce qui constitue une limite forte, par ailleurs fréquente dans la modélisation où l'espace joue un rôle. Pourtant, en particulier dans un modèle mettant en place des migrations,

il est difficile de s'abstraire du contexte spatial. Le monde modélisé constitue certes un système en lui-même, mais c'est aussi un système qui n'est qu'une des composantes d'un système de peuplement plus large (le royaume des Francs, voire l'Europe du Nord-Ouest).

Nous avons choisi de modéliser les échanges avec l'extérieur par le biais d'un renouvellement partiel des foyers paysans. À chaque pas de temps, une proportion (5%) des foyers paysans existants est, à cet effet, supprimée de la simulation, et une quantité équivalente est réinjectée dans l'espace du modèle. Afin de ne pas bouleverser de manière artificielle le processus émergent de concentration, la localisation dans l'espace des nouveaux foyers suit la proportion de foyers paysans dispersés et agrégés existants à la date considérée : s'il y avait 90% de foyers paysans dispersés avant le renouvellement, 90% des foyers paysans ré-injectés seront localisés aléatoirement dans l'espace du modèle, et les 10% restant seront placés dans les agrégats existant¹¹.

2.3.4 Mise à jour du maillage paroissial

Le Moyen Âge voit apparaître un maillage dense, continu dans l'espace, constitué autour d'églises dotées de droits paroissiaux : les paroisses, qui organisent l'ensemble de la vie spirituelle de la population. Les archéologues ne s'accordent pas sur la date de leur apparition (avant la période étudiée), ni surtout sur le moment où elles constituent un maillage complet (vraisemblablement pendant la période modélisée). Ils s'accordent cependant sur le rôle de fixation et de stabilisation du territoire qu'elles ont eu (ZADORA-RIO 2008). On sait aussi, d'après les traces empiriques, que la répartition des églises paroissiales n'est pas homogène et dessine des mailles de dimensions inégales. Dans les zones rurales, l'espacement des églises paroissiales est assez important (quelques kilomètres entre deux églises), alors que dans les zones urbaines, de nombreuses églises paroissiales peuvent coexister au sein d'une même ville.

Dans SimFeodal, le maillage paroissial est représenté à partir d'un diagramme de Voronoï autour des églises paroissiales. À chaque pas de temps, de nouvelles églises paroissiales apparaissent, à travers des mécanismes de promotion ou de création. Les diagrammes de Voronoï sont fortement sensibles à l'ajout ou à la suppression de points, par la manière dont ils sont conçus. Il est donc nécessaire, à chaque pas de temps, de ré-initialiser la construction du maillage, c'est-à-dire de répéter l'opération de création du diagramme de Voronoï, en repartant d'une situation « neutre » d'où l'on aura supprimé le maillage pré-existant¹¹. À ce titre, on peut parler de mécanisme de « mise à jour » du maillage, qui comprend donc autant la délimitation des paroisses (les mailles) que la création et promotion de nouvelles églises

11. Selon un tirage aléatoire pondéré : les agrégats les plus peuplés attireront potentiellement plus de ces nouveaux foyers paysans que les moins peuplés. Cette logique d'attachement préférentiel (**retrouver où j'en parle si c'est avant**) permet de modéliser l'attractivité qu'exercerait un agrégat peuplé, potentiellement plus connu, sur des foyers paysans venant de régions voisines.

paroissiales.

11. Il n'y a pas pour autant de perte totale d'héritage : la tessellation de Voronoï est un processus déterministe, et si les églises paroissiales n'ont pas changé, le maillage sera identique. De plus, les répercussions des ajouts d'églises paroissiales sont assez localisées : si on ajoute une église paroissiale dans une zone déjà dense, par exemple dans un agrégat, les répercussions sur les mailles situées en dehors de cette zone seront minimes voire nulles.

Le mécanisme de mise à jour du maillage paroissial s'effectue en trois étapes distinctes :

— Dessin du maillage

Dans SimFeodal, le maillage paroissial est calculé et représenté sous la forme d'une partition de Voronoï autour des églises paroissiales. On garantit ainsi un pavage complet du territoire. Ce pavage sera lâche dans les zones les moins peuplées et dotées de moins d'églises paroissiales. Dans les zones les plus peuplées, au contraire, il sera plus dense, par exemple dans les zones contenant les agrégats les plus importants.

— Crédation de paroisses « urbaines »

Les agrégats de population sont localisés dans l'espace, et à ce titre, nécessairement inclus dans au moins une paroisse. Au fur et à mesure que les agrégats croissent, le nombre de foyers paysans que doit desservir chaque paroisse augmente. Empiriquement, on sait que plus le nombre de foyers paysans à desservir était important, plus forte était la probabilité de créer une nouvelle paroisse.

SimFeodal comprend, pour modéliser cela, un mécanisme de création de paroisses. Selon une logique probabiliste, le modèle fait apparaître de nouvelles églises, directement dotées de droits paroissiaux, au sein des agrégats les plus peuplés. Plus un agrégat est peuplé, plus il a de probabilités de voir apparaître, en son sein, une nouvelle église paroissiale dédiée à sa desserte. Afin d'éviter l'apparition exponentielle d'églises paroissiales au sein d'un agrégat, cette probabilité est pondérée par le nombre d'églises paroissiales déjà présentes dans l'agrégat. La probabilité est donc fonction du nombre de foyers paysans par église paroissiale.

— Promotion de paroisses « rurales »

Tout au long de son développement et à mesure de l'importance sociale qu'il acquière, on sait que le maillage paroissial se densifie, pour parvenir en fin de période au maillage quasi-communal qu'on lui connaît désormais. Cette densification est observée, empiriquement, partiellement dans les zones denses, mais aussi très largement de manière homogène sur le territoire, notamment dans les zones les moins peuplées, afin de garantir un accès facilité aux sacrements à l'ensemble des foyers paysans.

Dans le modèle SimFeodal, quand le nombre de foyers paysans de ces zones peu denses devient malgré tout trop important, de nouvelles églises paroissiales sont créées. Quand c'est possible, ces nouvelles églises paroissiales peuvent s'appuyer sur les églises locales existantes

non dotées de droits paroissiaux. Quand il n'y a pas d'église non paroissiale à proximité, on construit de nouvelles églises qui deviendront centres paroissiaux. Les spécificités de ce mécanisme sont détaillées dans la section dédiée (section 2.7.2.3).

2.3.5 Détection des Pôles

Dans SimFeodal, lorsque les foyers paysans migrent, ils sont attirés par des pôles d'attraction, qui sont des ensembles composites d'agents de type attracteur (voir section 2.2.1 et en particulier la figure 2.2-A). Les pôles sont caractérisés par une attractivité, fonction du nombre et du type d'attracteurs qui les composent. Plus l'attractivité d'un pôle est importante, plus il est susceptible d'attirer des foyers paysans lors de leur phase de migration. Les pôles jouent un rôle central dans le mécanisme de migration, et leur définition, c'est-à-dire la manière dont ils sont constitués, revêt alors une importance nette. La logique d'ensemble (voir section 2.7.2.2 pour le détail) est basée sur le regroupement dans l'espace de plusieurs attracteurs. Quand plusieurs attracteurs sont suffisamment proches les uns des autres, ils constituent un unique pôle dont l'emprise spatiale et l'attractivité sera affectée par la localisation et les caractéristiques des attracteurs ainsi regroupés. Ainsi, quand une église paroissiale est située à proximité¹² d'un château, et que ce château est à proximité d'un agrégat de population, ces trois éléments forment un pôle représenté par l'enveloppe convexe formée par leurs géométries. Afin de ne pas artificiellement diviser des pôles pré-existants, ou au contraire voir apparaître de nombreux pôles dans un espace restreint, les pôles les plus proches sont ensuite fusionnés.

2.3.6 Satisfaction des Foyers Paysans

La mesure de la satisfaction¹³ des foyers paysans est le principal déterminant du mécanisme de migration, l'un des mécanismes les plus importants de SimFeodal. Elle qualifie la capacité des foyers paysans à remplir leurs besoins fondamentaux : « se nourrir » (satisfaction matérielle) ; « assurer son salut » (satisfaction religieuse) ; et « éviter d'être l'objet de violences » (satisfaction « protection ») (CURA et al. 2017b, Tableau 1, p. 309). La satisfaction d'ensemble, qui intervient dans la probabilité de migration, est une synthèse numérique de ces trois satisfactions spécifiques. Ces composantes sont toutes jugées indispensables : elles ne sont pas pondérées, et la plus faible sert de base au calcul

12. Cette proximité est configurable par le biais d'un paramètre. Dans SimFeodal, on situe ce seuil à 200 mètres en prenant appui sur les espacements, observés empiriquement, entre les entités considérées dans le modèle comme des attracteurs.

13. Notons que ce terme n'est pas entièrement « satisfaisant » puisque la migration des foyers paysans est favorisée par une faible satisfaction : plus la satisfaction est faible, plus forte est la probabilité qu'il entreprenne une migration. Le moteur de la migration est une satisfaction insuffisante (qui n'est donc pas un mécontentement ou « dissatisfaction »), dont l'on retrouve le sens dans le terme anglais *dissatisfaction*.

de la satisfaction d'ensemble¹⁴.

Satisfaction matérielle

Dans SimFeodal, on considère que plus un foyer paysan doit régler de droits, moins il est satisfait. La satisfaction matérielle est une fonction des différentes redevances dont un foyer paysan doit s'acquitter. Comme pour la satisfaction générale, notons que l'appartenance ou non à une communauté intervient dans ce calcul. On estime en effet que les communautés (pay-sannes, rurales, villageoises...) permettent de constituer une force suffisante pour exercer un véritable contre-pouvoir face à des seigneurs qui seraient trop exigeants.

Satisfaction religieuse Cette satisfaction représente la capacité d'un foyer paysan à se rendre facilement à l'église pour y assister aux différents sacrements (baptêmes, mariages, eucharistie...) qui rythment la vie spirituelle de l'époque. Tout au long de la période, la fréquentation de ces offices religieux augmente en fréquence aussi bien qu'en importance sociale, par exemple à l'occasion des réformes grégoriennes.

Dans SimFeodal, la satisfaction religieuse est modélisée comme une fonction de la distance à l'église paroissiale la plus proche : plus on est éloigné d'une église paroissiale, moins la satisfaction est forte. La fonction de distance n'est pas continue : elle est bornée par des seuils, maximaux et minimaux, qui permettent de définir ce qui est considéré comme une distance à ne pas dépasser ou au contraire comme une distance garantissant une satisfaction maximale. Ces seuils de distance évoluent au cours des pas de temps du modèle, devenant plus restrictifs (les distances minimales et maximales diminuent), lors de périodes où les obligations religieuses sont plus lourdes, impliquant de se rendre plus souvent à l'église.

Satisfaction « protection » Avec la diminution du pouvoir de l'autorité centrale carolingienne assortie d'un émiettement des pouvoirs locaux, la région d'étude subit un regain de violences militaires. L'apparition et le développement progressif des châteaux forts en sont des symptômes représentatifs. Ils assurent une protection à la population en cas de violence, protection qui devient de plus en plus indispensable au cours de la période.

Dans SimFeodal, de la même manière que la satisfaction religieuse dépend de la distance aux églises, on considère que la satisfaction « protection » des foyers paysans dépend de la distance au château le plus proche. Cette distance est aussi segmentée par des seuils, eux aussi évolutifs au cours du temps de la simulation. Le calcul de la satisfaction en termes de protection dépend en plus d'un paramètre, le « besoin de protection », qui permet de représenter l'importance du climat de violence, et notamment, la forme de

14. Les modalités précises de calcul de la satisfaction d'ensemble, ainsi que de ses composantes matérielles, religieuses et de protection, sont détaillées dans la section 2.7.3.1.

son évolution temporelle.

2.3.7 Migration des Foyers Paysans

Sur l'ensemble de la période considérée, on observe dans les travaux empiriques de « fréquentes » relocalisations (relativement au temps long de 400 ans que nous étudions) des résidences des foyers paysans, c'est-à-dire la construction de nouvelles habitations et l'abandon des anciennes. Ces « migrations » sont observées aussi bien sur des distances faibles (quelques centaines de mètres, voir kilomètres) que sur des distances longues, les foyers paysans changeant par exemple de région. Thématiquement, l'hypothèse émise pour expliquer ces migrations est qu'elles résultent de l'insatisfaction des principaux besoins, matériels, spirituels et en termes d'intégrité physique. En changeant de localisation et éventuellement en s'agrégeant, les foyers paysans espèrent trouver un mode de vie plus clément que celui de la génération précédente, par exemple, dans le cas de l'agrégation, en mettant en commun leurs outils de production et en présentant une contestation collective face à d'éventuelles exactions ou demandes des seigneurs féodaux.

Dans SimFeodal, une trop faible satisfaction des foyers paysans les poussent à migrer, c'est-à-dire à s'installer dans un nouveau lieu. Il ne s'agit pas ici de migrations résidentielles, quotidiennes ou saisonnières : ces migrations sont à entendre sur le temps long. Elles s'appuient d'ailleurs sur une satisfaction qui n'est mesurée qu'à chaque pas de temps du modèle, c'est-à-dire tous les 20 ans. La satisfaction est alors à comprendre comme un jugement global sur l'adéquation de la localisation d'un foyer à l'issue de 20 ans d'installation. Il s'agit donc de modéliser le choix de relocalisation qui peut être réalisé tous les 20 ans, ou schématiquement, à chaque nouvelle génération.

Le mécanisme simulé repose sur le principe que les foyers paysans suffisamment satisfaits ne sont pas amenés à migrer et que la migration répond à une insatisfaction des agents-foyers paysans. L'implémentation de cette logique suit un mécanisme probabiliste, où l'insatisfaction augmente la probabilité de migrer. Le mécanisme de migration sera détaillé dans la section 2.7.3.2. Il s'agit sans doute du mécanisme le plus important et impactant du modèle SimFeodal : à ce titre, il a subit de très nombreux changements depuis le début de la conception du modèle, tel qu'illustré dans [le chapitre 4](#).

Dans la version de SimFeodal ici présentée ([version 6.3](#)), la migration répond à une succession de conditions. Dans l'ensemble, quand les foyers paysans migrent, c'est nécessairement vers un pôle d'attraction (voir figure 2.2-A), et si possible un pôle plus attractif pour ceux qui sont déjà localisés dans un pôle. Cette migration peut prendre deux formes :

- une migration « locale », où les foyers paysans cherchent des pôles plus attractifs dans un rayon défini (2 500 mètres, valeur paramétrable) ;
- et la migration « lointaine », où au contraire les foyers paysans cherchent un pôle situé au delà du rayon local.

La migration locale est privilégiée sur la migration lointaine¹⁵. Quand la

migration locale n'est pas possible (absence de pôles locaux, tirages aléatoires insatisfaisants...), alors les foyers paysans envisagent une migration lointaine.

2.3.8 Gains de droits

Au fur et mesure de l'avancement de la période, les travaux empiriques montrent que le pouvoir central s'efface et que les ressorts locaux subissent un émiettement important, voyant apparaître de nombreux seigneurs de moindre importance (les chevaliers notamment). Ces seigneurs s'arrogent le prélèvement de nouveaux droits (droits banaux, droits de basse justice etc.), augmentant d'autant la charge fiscale dont doivent s'acquitter les foyers paysans.

Dans SimFeodal, cela est modélisé sous la forme de l'apparition constante de nouvelles zones de prélèvement par l'intermédiaire desquelles les seigneurs pourront prélever de nouveaux droits (voir figure 2.1-A). Cela peut concerner de nouveaux seigneurs, lors de leur apparition dans l'espace du modèle, ou au contraire se faire au bénéfice de seigneurs plus anciens. Du point de vue de l'implémentation, ce comportement est formalisé sous la forme d'une probabilité, pour les petits seigneurs, de créer une nouvelle zone de prélèvement autour de leur localisation, à chaque pas de temps. Ce mécanisme concerne uniquement les petits seigneurs.

Pour les grands seigneurs, le gain de droits est modélisé sous une autre forme. À partir d'une date donnée, les grands seigneurs ont la possibilité de prélever des droits de haute justice sur les foyers paysans situés à proximité de leurs châteaux. Cette possibilité est matérialisée par la création de zones de prélèvement de haute justice, selon un tirage aléatoire dont la probabilité de réalisation augmente au cours des pas de temps.

2.3.9 Collecte des droits

Empiriquement, les seigneurs prélevaient des droits auprès de leurs sujets pour différentes raisons : droits de haute et moyenne justice, sous la forme de taxes universelles dont chacun devait s'acquitter, mais aussi droits d'usages, banaux par exemple, autour de l'utilisation de tel ou tel équipement collectif (le four à pain banal, le moulin...). Contrairement aux sociétés actuelles, ces droits n'avaient pas nécessairement de matérialité spatiale : deux habitants voisins étaient susceptibles de s'acquitter de droits à des seigneurs très différents. Cette répartition des droits pouvait être faite en fonction de l'usage d'un matériel, ou en fonction d'une appartenance familiale (la « taille » personnelle) par exemple, sans que la localisation précise du foyer concerné n'entre en jeu.

15. Pour une faible part des agents, intitulés « non mobiles », et qui représentent les foyers paysans dépendants, c'est-à-dire qui n'avaient pas l'autorisation de quitter les terres de leurs seigneurs (serfs, esclaves...), seule la migration locale est d'ailleurs possible.

Dans SimFeodal, on a cependant choisi de modéliser ces droits au travers de représentations géographiques agentifiées de l'emprise spatiale des droits, c'est-à-dire en créant des agents-zones de prélèvement. Cette simplification de la complexité empirique ne correspond pas nécessairement aux cas les plus courants, mais est acceptable aux yeux des thématiciens impliqués dans la construction de SimFeodal. Cette vision s'inscrit de plus dans une approche surfacique de l'espace continu où les relations sont notamment caractérisées par des inclusions et intersections géométriques. Une vision réticulaire, parfois privilégiée par les médiévistes ([demander des sources à Julie](#)) serait sans doute plus appropriée, mais introduirait des paradigmes très différents dans un modèle déjà très complexe.

Celles-ci sont de trois types (cf. figure 2.1-A tableau 2.2), qui correspondent à trois grandes catégories de droits connus : les droits fonciers ; les droits de haute justice ; et les autres droits, qui regroupent une forte diversité de redevances locales (droits banaux, droits de basse et moyenne justice, droits locaux...).

Chaque droit a ses propres modalités de collecte (voir le détail en section 2.7.4.1). On peut résumer cela de manière géométrique : les zones de prélèvement sont des cercles de rayon variables, qui se superposent et s'intersectent très largement. Les seigneurs (propriétaires et gardiens) prélèvent des droits aux foyers paysans situés dans les zones de prélèvement. Plus ces derniers sont situés dans une région dense en zones de prélèvements, plus ils seront amenés à s'acquitter de nombreux droits, et plus leur satisfaction matérielle sera faible. Pour les seigneurs, à l'inverse, plus les redevances collectées seront importantes (plus ils posséderont de zone de prélèvement recouvrant de nombreux foyers paysans), plus leur puissance sera importante, ce qui leur permettra notamment de construire des châteaux, gages de renommée et de revenus accrus.

2.3.10 Dons entre seigneurs

Historiquement, on connaît la pratique de certains seigneurs consistant à nommer des gestionnaires ou de distribuer des terres à des seigneurs de moindre importance pour s'assurer de leur vassalité. De nombreuses lignées aristocratiques sont ainsi apparues suite à l'adoubement d'un roturier en tant que chevalier, par exemple pour le remercier de ses services militaires et en faire un allié inféodé. Dans le système féodal, à travers le don, les seigneurs constituent ainsi de larges réseaux de vassalité, qui leurs procurent prestige, pouvoir économique et puissance militaire.

Dans SimFeodal, nous représentons ces logiques par un mécanisme de dons entre seigneurs. Ce don, que nous nommons « gardiennage », consiste pour un seigneur à donner une partie de ses possessions à un autre seigneur. Notons que dans le détail du mécanisme, il s'agit plutôt d'un prêt que d'un don : le seigneur donateur continue à percevoir des recettes sur les éléments donnés en gardiennage¹⁶. Propriétaire initial et gardien s'enrichissent donc

simultanément, ce qui permet de modéliser le gain de puissance économique pour le gardien, et de puissance symbolique pour le donateur.

Comme les seigneurs ont alors tout intérêt à donner, le mécanisme de don repose sur une logique probabiliste : à chaque pas de temps, les seigneurs ont une certaine probabilité de donner chacune de leurs possessions qui ne l'auraient pas encore été. Ces possessions sont ici représentées par les zones de prélèvement et les châteaux des seigneurs. Dans le cas des zones de prélèvement, les seigneurs récipiendaires sont choisis de manière privilégiée dans le voisinage des seigneurs donateurs : on favorise ainsi une transmission locale qui correspond aux connaissances empiriques. Pour les châteaux, il n'y a pas de préférence locale : la portée symbolique des châteaux n'est pas la même que celle d'un moulin par exemple, et le seigneur récipiendaire sera alors choisi de manière plus globale. Toutefois, seuls des seigneurs de faible importance peuvent être récipiendaires des dons de châteaux : pour les seigneurs, le don permet de s'assurer la vassalité d'un autre seigneur, et celui-ci ne peut dès lors être que moins puissant que soi. Ces seigneurs de faible importance, dans le modèle, sont ceux qui ne sont pas déjà châtelains, c'est-à-dire qui n'ont pas déjà de château en propre ou en garde.

Notons que ces dons n'ont pas d'influence sur la satisfaction des foyers paysans : pour eux, seul un seigneur (le gardien, ou le propriétaire quand la zone n'a pas été confiée en garde) prélève les droits. Le mécanisme de collecte n'est donc pas symétrique : du côté des seigneurs, il représente en même temps le gain de puissance économique (pour le gardien) et symbolique (pour le donateur). Au contraire, pour les foyers paysans, la collecte ne représente qu'une contrainte économique : seul le prélèvement du gardien (ou propriétaire initial si la zone de prélèvement n'a pas été donnée en gardiennage) influe sur la satisfaction matérielle.

2.3.11 Construction et promotion des châteaux

Tout au long de la période, de nouveaux châteaux sont construits et renforcés. C'est l'apparition des « châteaux forts ». Si l'on connaît des châteaux antérieurs à la période étudiée, leur démultiplication survient surtout à partir de la seconde moitié du X^e siècle. Ils sont surtout construits par les grands seigneurs existants afin de mailler le territoire d'un réseau de protection, même si certains sont aussi l'œuvre de seigneurs de moindre envergure qui se sont enrichis pendant la période en profitant du système féodal. En Touraine, on considère que la majeure partie des châteaux forts ont été construits entre le X^e et le XIII^e siècle, et que leur production a ensuite fortement ralenti. Les châteaux sont bâtis en bonne partie dans des villes déjà attractives, même si l'on observe aussi quelques créations dans des espaces peu peuplés, qui tendront

16. Dans le détail, on peut même noter que les recettes des éléments donnés sont supérieures aux droits collectés en propre : en donnant un bien, on considère ainsi qu'il rapporte plus que ce qu'il aurait garanti comme revenu en le conservant pour son unique usage. Cela permet par exemple de formaliser le gain de puissance symbolique obtenu par l'inféodation de seigneurs inférieurs. Le tableau des puissances acquises selon le type de collecte (tableau 2.5) quantifie ce principe.

alors à le devenir par la suite (les bourgs castraux).

Dans SimFeodal, on fait apparaître les châteaux de manière endogène, en considérant qu'il n'y en a aucun au début de la période. À partir de 940, les seigneurs ont la possibilité de créer des châteaux. Cette possibilité est basée sur une probabilité, fonction de la puissance des seigneurs, c'est-à-dire de l'accumulation des redevances perçues à chaque pas de temps. Plus la puissance d'un seigneur est importante, plus il a de chances de pouvoir créer un château. Pour que les simulations soient comparables entre les différents paramétrages, et en particulier selon le nombre de foyers paysans implémentés dans chaque simulation, on mobilise cette puissance de manière relative : la puissance relative d'un seigneur est le rapport entre sa propre puissance et la somme des puissances de tous les seigneurs.

Les grands seigneurs, qui perçoivent plus de droits dès le départ de la simulation, sont ainsi favorisés. Au fur et à mesure du déroulement de la simulation, certains petits seigneurs peuvent toutefois aussi être favorisés par leurs prélèvements et par les gardiennages reçus. Dans de rares cas (avec une faible probabilité donc), ils peuvent alors être amenés à bâtir eux-aussi des châteaux. Les règles spécifiques et précises de construction de châteaux sont explicités dans la partie section 2.7.4.2.

Parmi les nombreux châteaux construits, on sait d'après les connaissances expertes qu'il y a une forte hétérogénéité dans leurs dimensions, leur importance stratégique et le degré de protection qu'ils apportaient. Par rapport aux dynamiques étudiées dans ce cas d'étude, nous avons jugé peu utile de rendre compte de toute l'étendue de cette diversité, qui n'influe pas véritablement sur les logiques de polarisation ou de fixation du peuplement. D'après les connaissances historiques, on note tout de même que certains châteaux, les plus importants, ont eu un rôle plus remarquable dans la polarisation : soit qu'ils aient été suffisamment « forts » pour attirer une population plus nombreuse, soit que la plus forte population déjà présente ait justifié la création de châteaux plus imposants, soit que ce soit une conjonction de ces phénomènes via une boucle de rétroaction.

Dans SimFeodal, on a choisi de simplifier cette hiérarchie en distinguant deux types de châteaux : les « petits châteaux » et les « gros châteaux », ces derniers ayant un pouvoir d'attraction plus développé que les petits. Ces châteaux renforcent l'attraction des pôles dont ils font partie et par là même accroissent la probabilité de voir des agrégats majeurs se développer à proximité. Lors de leur création (voir *infra*), les châteaux sont toujours des « petits châteaux ». Le mécanisme de promotion, probabiliste, permet à un château situé dans un pôle important (c'est-à-dire constitué de plusieurs attracteurs comme des agrégats ou des églises paroissiales) de devenir « gros château », et renforce encore l'attrait de ce pôle déjà avantageux.

Notons qu'en matière d'ordonnancement, la construction des châteaux a lieu après la promotion en gros châteaux, et aussi après le don de ces mêmes châteaux (cf. figure 2.6), ce qui pourrait sembler contre-intuitif. Ce choix a été fait pour symboliser la durée de construction des châteaux, bien plus longue que les autres phénomènes d'apparition décrits dans le modèle : un château apparaît en fin de tour, il n'est donc pas véritablement utilisable avant le tour suivant, soit 20 ans plus tard.

2.3.12 Crédit de nouveaux seigneurs

L'émission des pouvoirs pousse à l'apparition de nombreux seigneurs, majoritairement d'envergure très locale, tout au long de la période. On estime qu'il y avait une vingtaine de seigneurs en Touraine en début de période et plus de 200 en 1200. Ces seigneurs sont détenteurs d'un faible pouvoir et ne possèdent généralement pas de terres « en propre » : une large proportion tire ses revenus de terres et d'installations dont ils assurent le gardiennage pour leur suzerain, par exemple sous la forme de banalités ou de délégations de moyenne justice.

Dans SimFeodal, l'accroissement des seigneurs est modélisé sous la forme de l'apparition régulière de nouveaux seigneurs. À chaque pas de temps, un nombre quasiment constant¹⁷ de nouveaux seigneurs est ainsi créé. Parmi ces seigneurs, seule une faible proportion (10%) est dotée de terres et collecte donc des droits fonciers. Les autres seigneurs constituent un vivier potentiel de récipiendaires de dons divers (voir section 2.3.10). L'ensemble de ces seigneurs sont répartis, spatialement, au sein des agrégats existants lors de leur création.

2.3.13 Détection des agrégats

L'un des constats forts ayant mené à l'identification d'une « transition » (PUMAIN et al. 2017b; NUNINGER et al. 2017) dans le système de peuplement de l'Europe du Nord-Ouest est la hiérarchisation du peuplement. On constate ainsi une concentration de la population dispersée, avec l'apparition de hameaux, villages et petites villes suivant une hiérarchie de population. L'utilisation de ces termes plus spécifiques est particulièrement sensible en histoire et en archéologie, en particulier en raison d'usages potentiellement anachroniques : certains refusent par exemple l'appellation de villes aux agglomérations secondaires antiques du IX^e siècle. Nous avons donc choisi de ne pas subdiviser, en termes lexicaux, le continuum des tailles et types d'agglomération de foyers. On fait usage, dans son sens le plus littéral, du terme « agrégat » de population pour désigner l'ensemble de ces concentrations humaines.

17. Il s'agit d'un nombre aléatoire tiré d'une distribution normale dont l'écart type est très faible au regard de la moyenne. Cela permet d'avoir un nombre à peu près constant de 200 seigneurs en fin de simulation, après le tirage effectué à chaque pas de temps. Le faible aléa insuffle toutefois une certaine variabilité qui nous permet de démarquer les simulations.

Dans SimFeodal, ces agrégats sont interprétés de manière morphologique, à l'instar des agglomérations de l'INSEE : est agrégat un regroupement d'au moins 5 foyers paysans, espacés l'un à un autre d'au plus 100 mètres. Cette définition permet de représenter des entités géographiques très diverses, depuis le petit agrégat composé de quelques foyers paysans à l'agrégat majeur, semblable à une petite ville, constitué de plusieurs centaines de foyers. L'agrégat est une entité spatiale au sens propre, dotée de ses propres attributs et de sa propre emprise spatiale, constituée par l'enveloppe convexe des foyers paysans qui le composent : c'est une entité individuelle mais composite.

Certains agrégats peuvent contenir une « communauté » (voir figure 2.3), c'est-à-dire une structure institutionnalisée gérée par les foyers la composant et qui procure un avantage en matière de rapport de force et de subsistance matérielle (avec, par exemple, les logiques de gestion collective des terres et des outils que permettent les communautés agraires).

Dans SimFeodal, les agrégats ont une probabilité (20%, paramétrable), à chaque pas de temps, de voir apparaître une communauté en leur sein. D'un point de vue informatique, cela complexifie énormément la détection des agrégats : dès lors que des agents ont des propriétés propres, celles-ci doivent en effet être transmissibles dans le temps, c'est-à-dire d'un pas de temps à l'autre. Pourtant, la détection des agrégats doit être renouvelée à chaque pas de temps, ce qui signifie qu'un agrégat détecté en 900, situé au même endroit qu'un agrégat de 880, ne peut que difficilement lui être associé¹⁸. Le mécanisme spécifique de détection, de constitution et de transmission des attributs des agrégats est donc particulièrement complexe, et fait l'objet d'une présentation détaillée plus loin dans le chapitre (section 2.7.2.1).

2.3.14 Actualisation des pôles

La détection des pôles (section 2.3.5) intervient relativement tôt dans l'ordonnancement des mécanismes (voir la figure 2.6 dans la section 2.3). Il est par exemple nécessaire que les pôles soient définis avant que le mécanisme de migration des foyers paysans puisse être enclenché, celui-ci dépendant en partie de ces pôles. Pourtant, en vue de préparer et de sauvegarder les *outputs*, il est nécessaire de redéfinir les pôles avant la fin de l'itération, parce que les attracteurs qui les constituent peuvent avoir changé : apparition de nouveaux châteaux, apparition ou disparition d'agrégats contenant une communauté....

Cela permet par exemple, lors de l'enregistrement des sorties, de conserver un lien entre un agrégat et le pôle dans lequel il se situe, notamment pour étudier les relations entre la composition des pôles et les populations des agrégats qui y sont attachées. Dans SimFeodal, nous sommes alors obli-

18. C'est un problème récurrent des méthodes de *clustering* dynamique que de réussir à mener des associations entre les *clusters* de différentes dates.

gés, afin d'avoir des sorties exploitables, de reconstruire les pôles en fin de tour. Cette duplication d'un mécanisme est malheureusement peu optimale, mais rendue nécessaire par la structure des différents mécanismes précédents et en particulier par l'interdépendance qui caractérise de nombreux types d'agents dans le modèle.

2.3.15 Enregistrement des *outputs*

Nous avons besoin d'enregistrer des données relatives à l'ensemble des agents, pris individuellement, et à leurs attributs. Les données produites par la simulation sont par conséquent assez massives et revêtent une importance particulière. Lors de cette phase, des variables globales et spécifiques sont actualisées, des indicateurs synthétiques sont calculés, et l'ensemble des données subit des traitements voués à en simplifier la conservation, par exemple en réduisant la précision des nombres décimaux¹⁹. L'enregistrement des données d'un modèle est un problème complexe, dont les enjeux et difficultés sont largement résumées dans le chapitre 5 ([section 5.1](#)).

2.4 Concepts de modélisation – *Design concepts*

Cette section du protocole ODD vise à mettre en avant les concepts courants de la modélisation de systèmes complexes qui sont employés dans le modèle. Les catégories du protocole ODD²⁰ visent à l'exhaustivité, et l'ensemble des concepts décrits ne sont pas nécessairement mobilisés dans SimFeodal. Par soucis de clarté, on décrira d'abord les grands principes de modélisation qui nous semblent fondamentaux dans SimFeodal, et ensuite, le cas échéant, des ensembles de concepts plus secondaires.

2.4.1 Principes de base - *Basic principles*

SimFeodal a été pensé en s'appuyant sur trois principes importants qui ont fortement orienté son développement conceptuel autant que son implémentation. On souhaitait que le modèle (1) s'ancre et s'appuie résolument sur un espace géographique, (2) que l'évolution de la structure spatiale résulte de dynamiques multi-scalaires et (3) que la fixation de cette structure est due à des

19. Pour illustrer l'importance de ce traitement d'apparence anecdotique, on peut prendre l'exemple de l'enregistrement des géométries. Celles-ci, dans la plate-forme Gama (TAILLANDIER et al. 2018) utilisée pour SimFeodal, sont exportées dans un format textuel normalisé, le « Well-Known Text » (WKT). Par défaut, chaque géométrie est décrite avec une précision de 12 chiffres décimaux, soit une résolution spatiale proche du picomètre, l'ordre de grandeur des atomes. Cette précision n'a strictement aucune utilité dans un modèle où les ordres de grandeur minimums tournent autour des dizaines et centaines de mètres. D'un point de vue informatique, stocker 12 décimales au lieu d'entiers démultiplie considérablement la place nécessaire pour l'enregistrement des données. Ces étapes de simplification sont donc indispensables pour disposer d'un modèle fonctionnel et exploitable.

20. Le détail de ces « concepts de conception » sont énumérées – et illustrées avec des exemples de questionnement – dans la partie 4 du tableau 2.1, au début de ce chapitre.

mécanismes d'auto-renforcement spatial. Ces principes constituent des choix forts, préalables à l'implémentation en tant que telle, et ont ensuite contribué à guider l'ajout et la spécification des mécanismes. Le profil, thématique et disciplinaire des co-concepteurs de SimFeodal n'est certainement pas étranger à ces choix. En rassemblant archéologues et géographes modélisateurs dans un projet de modélisation spatiale, le résultat ne pouvait qu'être très influencé par l'approche systémique et de l'analyse spatiale.

Space Matters SimFeodal est un modèle intrinsèquement spatial. De nombreux modèles agents « mobilisent » l'espace, c'est-à-dire qu'ils s'appuient sur un espace euclidien pour représenter les interactions et émergences qu'ils décrivent. Pourtant, dans ces modèles, l'espace n'est souvent qu'un support qui tient lieu de référentiel dans lequel on pourra représenter et visualiser un processus quelconque : on parle d'ailleurs assez peu d'espace, mais le plus souvent de « monde virtuel », ce monde n'étant qu'un contenant des agents modélisés. Par exemple, on trouve de nombreux modèles de réseaux dans les bibliothèques classiques de modèles agents, où l'espace support est une vue planaire plus qu'un support euclidien ou topographique réel.

Dans SimFeodal, au contraire et comme la brève description des mécanismes le montre, une très large partie des (inter)actions dépendent des distances (modèles de types gravitaires pour le calcul de la satisfaction religieuse et de protection), des contextes spatiaux (évaluation de l'environnement local pour les migrations locales) ou encore des voisinages (constitution d'agrégats, détection des pôles etc.). SimFeodal n'est donc pas un modèle qui ne ferait que prendre appui sur un espace-contenant. C'est un modèle dont le fonctionnement inhérent est spatial, voire géographique ou géométrique. *Space matters...*

Dynamiques multi-scalaires et Push-Pull L'évolution de la structure spatiale que l'on observe dans SimFeodal résulte de la migration des foyers paysans, qui tendent à se concentrer. En se concentrant, ils créent des agents de niveau supérieur (les agrégats), qui peuvent alors attirer de nouveaux foyers paysans, directement (attraction des agrégats) ou indirectement (une forte densité de foyers paysans pousse à la création d'églises paroissiales qui attireront alors à leur tour de nouveaux foyers). La migration des foyers paysans combine alors deux échelles d'agrégation : les agents migrent à un niveau individuel, mais ils sont attirés par des agents composites, de niveaux agrégés.

La mise en place de ce principe de migration est fortement inspirée par et ancrée dans une certaine pratique de modélisation, courante dans le champ des études de mobilité résidentielle, que l'on peut qualifier de « *push-pull* » (TANIER 2017). On entend par là que les agents subissent un double mécanisme, répulsif, qui les pousse à déménager (ou migrer dans SimFeodal), le *push*, et attractif, qui conditionne leur choix de destination à l'attractivité d'un lieu, le *pull*. Ce modèle est d'ordinaire mobilisé dans l'étude de mobilités résidentielles, ou encore vis-à-vis de pratiques quotidiennes de l'espace. Son application nous semble inédite sur des processus opérant dans le passé et sur un temps long comme celui sur lequel SimFeodal s'appuie.

Si ce choix peut paraître surprenant, il résulte avant tout d'une certaine « culture de modélisation », l'une des co-conceptrices du modèle ayant une forte habitude de modélisation de dynamiques résidentielles (*ibid.*). En dehors de l'importance de cette « path-dependency » d'un modèle aux conceptions préalables de ses modélisateurs, notons tout de même que ce type de modélisation nous semble assez facilitateur de dialogue avec des thématiciens . Cette vision « comportementaliste » et agent-centrée permet peut-être plus simplement que d'autres paradigmes de passer d'une connaissance experte spécifique à une modélisation plus générique.

Auto-renforcement par attachement préférentiel L'auto-renforcement est le dernier grand principe sur lequel SimFeodal s'appuie. Dans le modèle, plus un élément (pôle d'attraction par exemple) est important, plus il va attirer et accroître son importance en retour. Cette logique est assez proche du principe de rétroaction positive, si ce n'est qu'il ne s'agit ici que de renforcer ce qui est fort, et non d'amoindrir, en valeurs absolues, ce qui est déjà faible. La forme de cet auto-renforcement s'apparente en fait assez largement aux mécanismes d'attachement préférentiel (BARABÁSI et ALBERT 1999), où la croissance d'une entité est directement proportionnelle à sa taille.

Dans SimFeodal, l'attachement préférentiel est mobilisé, sous une forme faible, en matière de concentration : les pôles les plus importants attirent plus, et peuvent voir se développer des agrégats et des églises paroissiales qui à leur tour augmenteront leur attractivité. Cela concoure à des logiques de renforcement des plus forts. On notera toutefois que dans SimFeodal, la relation entre taille et attraction n'est pas continue mais bornée : à partir d'une certaine taille (un pôle contenant plus de 4 églises paroissiales par exemple), la croissance n'entraîne plus de hausse de l'attractivité. La forme de la hiérarchisation des tailles de pôles et agrégats n'est donc pas directement assimilable aux structures log-normales issues de l'application théorique de mécanismes d'attachement préférentiel. A ce titre, on ne peut prédire ou estimer les changements de hiérarchie dans le système depuis le simple énoncé des paramètres et mécanismes, et l'expérimentation par la simulation est alors nécessaire.

2.4.2 Théories et concepts de la modélisation agents mobilisés

Le protocole ODD définit un ensemble de *design concepts* qui peuvent être mobilisés dans la conception d'un modèle à base d'agents. Pour chacun de ces 10 concepts (voir tableau 2.1²¹), nous décrivons brièvement si et comment ils sont appliqués dans SimFeodal.

Émergence Ce mécanisme constitue l'un des fondements de nombreux modèles complexes, et SimFeodal n'y échappe pas. La diversité des éléments analysés dans le modèle est trop importante pour faire une liste des éléments qui y émergent (voir le chapitre 3, section 3.? par exemple), et l'on peut prendre pour exemple les modifications de structure spatiale des foyers paysans. Les foyers paysans ne communiquent ni n'interagissent directement les uns avec les autres, et pourtant ils tendent à se regrouper en formant des agrégats. Le système d'agrégats ainsi formé tend de plus à se hiérarchiser fortement au fur et à mesure des migrations des foyers paysans. Il y a donc émergence d'un système de peuplement hiérarchisé à partir de choix de migrations individuels, sans que cette hiérarchie ne soit inscrite dans les intentions des agents-foyers paysans.

Adaptation et Objectifs Dans SimFeodal, le concept d'adaptation n'est pas présent au sens littéral : les agents ne s'adaptent pas à un environnement en modifiant leur comportement. Toutefois, le comportement, en lui-même, de certains agents est largement dépendant de l'environnement. Les foyers paysans par exemple, sont caractérisés par une satisfaction qui dépend largement de leur localisation spatiale. Quand cette satisfaction est insuffisante, les foyers paysans migrent.

De plus, le choix de la destination de la migration n'est pas anodin. Dans SimFeodal, un mécanisme stochastique pondéré est mobilisé de nombreuses fois pour établir la destination d'un foyer paysan, lors du renouvellement de population, (voir section 2.3.3) ou encore dans les mécanismes de migration locale ou lointaine (section 2.3.7) : la « loterie pondérée ». Dans ce mécanisme, les foyers paysans « choisissent » leur pôle de destination en fonction de l'attractivité de celui-ci : plus un pôle est attractif, c'est-à-dire composé de nombreux吸引ateurs, plus il est susceptible d'attirer. En migrant vers un pôle plus attractif, les foyers paysans ont une bonne probabilité de voir leur satisfaction augmenter.

Il y a donc bien adaptation à l'environnement dans la mesure où les agents-foyers paysans répondent à une insatisfaction par un déplacement et cherchent à maximiser leur satisfaction future, mais il n'y a pas adaptation au sens fort des systèmes multi-agents puisqu'il n'y a pas changement dans les règles de comportement.

21. Il nous semble que les dénominations de ces concepts ne sont pas extrêmement claires et intuitives. Nous recommandons au lecteur de plutôt chercher à les comprendre en lisant les exemples de questions donnés dans la colonne de droite du tableau.

On préfèrera cependant y voir le concept d'« objectif », tel que décrit par les auteurs du protocole ODD : « If agents (or groups) are explicitly programmed to meet some objectives, what exactly is that and how is it measured? When individuals make decisions by ranking alternatives, what criteria do they use? » (GRIMM, POLHILL et TOUZA 2017, p. 353, voir tableau 2.1)

Les foyers paysans ont donc un comportement adaptatif : individuellement, ils fuient les environnements trop inconfortables. Ce comportement est enrichi d'une logique d'objectif : en choisissant leur destination, ils visent à augmenter, à défaut de maximiser, leur satisfaction. Notons que dans ces deux cas, il ne s'agit pas d'intentionnalité consciente des agents, mais des mécanismes mis en place pour modéliser leur comportement à l'échelle agrégée.

Learning & Prediction Ces deux concepts, apprentissage et prédiction, ne nous semblent pas adaptés à la description de SimFeodal.

Perception - Sensing Perception et cognition sont des concepts fortement utilisés dans certains types de modèles²² où la rationalité du comportement des agents présente un enjeu majeur.

Dans SimFeodal, cette recherche de rationalité n'est pas présente, au moins sur un plan individuel. La logique de perception et de cognition est toutefois mobilisée, au moins en ce qui concerne les agents les plus réactifs du modèle, c'est-à-dire les foyers paysans. La manière dont leur satisfaction est mesurée se rapproche assez largement de questions cognitives : les foyers paysans ont une perception parfaite de la configuration spatiale qui les entourent (zones de prélèvement, églises et châteaux les plus proches etc.)

On trouve aussi une logique de perception inégale chez ces agents par la manière dont le mécanisme de migration est formalisé, sous forme d'un choix entre migration locale et migration lointaine (ou globale). En cas de migration locale, la recherche de destinations potentielles se fait dans le voisinage des foyers paysans. On peut y voir une notion de perception, et y considérer que ces foyers paysans (ou les foyers paysans « dépendants », par exemple les serfs) ont une perception uniquement locale de leur environnement, contrairement aux autres foyers paysans, qui effectuent des migrations lointaines et auraient alors une perception globale du monde modélisé.

Interaction L'interaction est un concept qui est presque indissociable de la plupart des modèles à base d'agents. On peut l'entendre dans le sens d'interactions entre des agents d'un même type, entre des agents de types différents, ou encore entre les agents et leur environnement. De plus, on peut aussi identifier les interactions directes, où les agents interagissent les uns avec les autres, et les interactions indirectes, où les agents agissent sur un élément tiers (environnement, autre type d'agent), avec lequel d'autres agents interagiront ensuite. Il y a bien dans ce dernier cas une interaction entre les agents, mais

22. On pourrait ainsi citer les modèles de type « BDI » (*Belief-Desire-Intention*, d'après BRATMAN, ISRAEL et POLLACK 1988), où le niveau de connaissance de l'environnement joue un rôle déterminant (CROOKS et al. 2019, p. 183–184).

elle se fait par l'intermédiaire d'un autre élément du modèle.

Dans SimFeodal, les interactions directes entre agents de même type sont assez minimes : on peut y inscrire les logiques de dons entre seigneurs, qui ont donc une interaction directe à cette occasion, notamment encouragée par une proximité spatiale. De manière moins directe, on peut aussi voir une interaction entre foyers paysans dans la constitution des agrégats : c'est par leur co-présence que les agrégats sont définis, et ces agrégats influent à leur tour sur le comportement des foyers paysans (en leur apportant potentiellement une meilleure satisfaction). L'interaction entre les foyers paysans est donc indirecte, par le biais de l'entité de niveau supérieur qu'ils constituent, mais demeure une interaction dont les éléments atomiques sont bien les foyers paysans.

L'autre grand type d'interaction qui peut être modélisé concerne les interactions avec l'environnement, dont l'usage est très répandu. Quand l'environnement est agentifié (via des *patches* ou cellules par exemple), et possède alors des attributs et comportements propres (une certaine quantité de ressources par exemple, qu'un comportement peut faire augmenter), il peut entrer en interaction avec un autre type d'agent, plus « actif ». Les modèles inspirés de « Sugarscape » (EPSTEIN et AXTELL 1996) sont emblématiques de cette approche. Dans ces modèles, des agents mobiles (des fourmis) « consomment » les ressources de leur environnement, lequel est représenté par des cellules contenant du « sucre » qui « pousse » régulièrement. Il y a interaction directe entre les agents et leur environnement.

Dans SimFeodal, la forme des interactions entre les agents et leur environnement n'est pas aussi nette, puisqu'il n'y a pas d'environnement « agentifié » en tant que tel. On peut cependant considérer comme environnement le contexte spatial dans lequel les foyers paysans évoluent : l'environnement est alors composé des autres types d'agents (châteaux, églises paroissiales, zones de prélèvement etc.). La satisfaction des foyers paysans (et leur comportement, que la satisfaction affecte) dépend très largement de leur environnement. En effet, les différentes composantes de la satisfaction sont affectées par les autres types d'agents : distance aux églises paroissiales pour la satisfaction religieuse, distance aux châteaux pour la satisfaction de protection, inclusion dans des zones de prélèvement pour la satisfaction matérielle.

Les foyers paysans ont donc une interaction directe, et forte, avec leur environnement, ou avec d'autres types d'agents, selon le point de vue que l'on adopte.

Stochasticité Dans les parties précédentes de ce chapitre, on a plusieurs fois mentionné l'importance de la stochasticité dans SimFeodal. Celle-ci est omniprésente : dès l'initialisation du monde (section 2.3.1), la distribution des foyers paysans, agrégats, églises et seigneurs est entièrement aléatoire. En parcourant l'ensemble du déroulement de SimFeodal (figure 2.6), on peut constater que tous les mécanismes comportent une part importante de stochasticité²³.

23. À l'exception des mécanismes de « délimitation » des entités spatiales (agrégats, pôles et paroisses) et de l'enregistrement des sorties.

L'aléa est présent dès le départ, *a minima* sur l'ordre d'appel des agents (section 2.3), et de manière bien plus importante dans d'autres mécanismes (loteries pondérées, probabilités de migration, probabilité de construction et de localisation de châteaux...). Conjuguée avec la complexité du modèle, c'est-à-dire l'imbrication des mécanismes qui rend leur comportement non linéaire, la stochasticité concourt à faire de SimFeodal un modèle profondément complexe. On ne peut prédire le comportement du modèle, ni même l'effet de certains paramètres (voir le chapitre 6, section analyse de sensibilité, ou chapitre 3 sur l'évaluation des params), sans le simuler.

Collectifs Cette partie de la grille de lecture ODD interroge l'existence et la constitution de « collectifs », c'est-à-dire d'agrégats d'entités individuelles, ainsi que la manière dont ils sont implémentés : dotés d'attributs propres ou enrichissant les attributs des entités constituantes.

Dans SimFeodal, l'exemple le plus évident est celui des agrégats, entités composites constituées de foyers paysans. Les agrégats ont leurs attributs propres, qui dépendent toutefois largement des foyers paysans (attractivité, emprise spatiale) qui les composent. Les agrégats ont également une caractéristique propre, qui ne dépend pas des foyers paysans les composant : l'existence en leur sein d'une communauté paysanne, modélisée sous la forme d'un attribut des agrégats. Cette caractéristique joue, sous la forme d'une boucle de rétroaction, sur les foyers paysans qui composent l'agrégat puisque la présence d'une communauté dans leur agrégat augmente mécaniquement la satisfaction matérielle et générale des foyers paysans.

Les pôles d'attraction sont un autre exemple de collectif. Ils sont ainsi composés d'attracteurs (églises paroissiales, châteaux et agrégats de population) situés à proximité les uns des autres. Comme pour les agrégats, certains attributs des pôles dérivent directement des attracteurs les composant, par exemple leur géométrie. Les pôles ont aussi une caractéristique propre : leur attractivité dépend certes des attracteurs qui les composent, mais cette relation n'est pas strictement de l'ordre du cumul : l'attractivité des pôles est en effet discrète plutôt que continue et basée sur des seuils. Par exemple, les quatre premières églises paroissiales qui font parti d'un pôle lui apportent un surplus d'attractivité, mais on considère qu'au delà, une nouvelle église paroissiale n'augmentera plus l'attractivité de ce pôle.

Observation Ce dernier « design concept » nous semble différer fortement des autres concepts décrits dans le protocole ODD²⁴.

Il s'agit de définir les données produites et collectées par le modèle à base d'agents. Dans SimFeodal, la collecte d'un maximum de données est indispensable à la bonne évaluation du modèle, qui ne peut être exécutée qu'à posteriori et par l'intermédiaire d'une « évaluation visuelle » basée sur l'étude de

24. Il est décrit ainsi dans GRIMM, POLHILL et TOUZA (2017, p. 354) : « What data are collected from the ABM for testing, understanding, and analyzing it, and how are they collected? »

nombreux indicateurs de sortie hétérogènes²⁵. SimFeodal est un modèle dont l'un des objectifs est de produire des données, lesquelles permettront de comprendre le modèle ultérieurement. Cette vision s'oppose à celle des modèles plus théoriques et parcimonieux, tel que celui de Schelling, qui peuvent être appréhendé directement pendant leur exécution.

2.5 Situation initiale – *Details - Initialisation*

2.5.1 Une situation initiale théorique et générée de manière endogène

SimFeodal est un modèle qui prend appui sur un espace théorique, très générique et épuré. Dans cet espace, certains agents se déplacent et font émerger des configurations spatiales particulières que l'on cherche à étudier. Le choix de la configuration initiale, qui sera transformée au cours du modèle, revêt donc une importance considérable, puisqu'il conditionne (ou tout du moins influence) les structures spatiales qui en seront issues.

Le « monde » simulé n'est pas un espace géographique précis qui correspondrait à l'observation empirique. La situation initiale ne correspond pas non plus à une organisation complètement aléatoire, comme c'est le cas dans le modèle de Schelling par exemple. Il s'agit d'un espace fictif, aléatoire, mais dont la structure a des propriétés précises au niveau macrogéographique, notamment à travers l'existence d'agrégats de deux types (villages et villes) dont le nombre et les effectifs sont fixés (et paramétrables). D'un point de vue thématique, il est en effet essentiel que la situation initiale du modèle SimFeodal corresponde à une configuration macrogéographique précise, puisque l'objectif est de modéliser la transition à partir de cette situation initiale (voir section 2.2.2.1). À l'inverse, il ne s'agit pas de simuler cette transition pour un espace géographique précis, où les villages et villes existant en 800 seraient positionnés. Le choix a donc été fait de fixer la macrostructure visée à partir d'un certain nombre de paramètres contrignant les positions des foyers paysans et des seigneurs, tout en les répartissant de manière aléatoire. Une infinité de situations initiales respectant les contraintes fixées au niveau macrogéographique sont ainsi possibles. Dans un souci de généricité il a été décidé d'intégrer la construction de la situation initiale en tant que première étape du modèle.

L'initialisation du monde simulé constitue un premier « sous-modèle » de SimFeodal, chargé de générer le monde dans lequel les agents évolueront. Le sous-modèle d'initialisation consiste en l'exécution de 3 mécanismes dédiés chacun à la création d'un type d'agent : création des églises ; des foyers paysans et agrégats ; et enfin création des seigneurs. Dans l'ensemble, un principe commun oriente la création de ces agents : ils sont répartis de manière presque aléatoire (voir section 2.3.1) dans l'espace « actif » simulé du modèle.

25. Ces problématiques occupent une large partie du chapitre 5 et nous les y expliciterons à cette occasion.

Églises Empiriquement, on estime qu'environ 150 églises pré-existent à la période modélisée pour un espace de cette dimension, en Touraine. Elles sont réparties de manière assez irrégulière et dispersée, à proximité de villages et de petites villes mais aussi isolées dans l'espace rural.

Dans SimFeodal, on modélise cette configuration spatiale en répartissant ces 150 * églises, de manière aléatoire dans l'espace du modèle. Pour représenter, parmi ces édifices religieux, ceux qui sont dotés des droits paroissiaux (environ une cinquantaine au début de la période), on procède à un tirage aléatoire d'un tiers * de ces églises auxquelles sont attribués des droits paroissiaux. Le semis correspondant aux emplacements de ces églises paroissiales va déterminer le dessin du maillage paroissial (zonal).

Foyers paysans et agrégats La création des foyers paysans est plus complexe, notamment car elle doit être aléatoire au niveau individuel tout en respectant une structure macroscopique contrôlée par les modélisateurs via les paramètres. De manière empirique, on peut résumer la distribution spatiale initiale à une immense majorité de foyers paysans dispersés, et à la pré-existence de quelques villages (peu peuplés) et petites villes (les agglomérations secondaires antiques, plus conséquentes en termes de population).

Pour générer la configuration initiale, il s'agit donc de reproduire ces grandes lignes de manière aléatoire tout en faisant en sorte que ces villages et petites villes soient bien modélisées sous la forme d'agrégats plus ou moins peuplés. La première étape consiste donc à déterminer, par tirage aléatoire, l'emplacement des agrégats (les « petites villes » empiriques). Le tirage se fait au niveau des foyers paysans et la localisation (aléatoire) du premier sélectionné détermine la localisation d'un premier agrégat. Les foyers paysans suivants (une trentaine *) sont localisés, de manière aléatoire, à l'intérieur d'un certain rayon (voir section 2.3.13) du premier (figure 2.7).

On répète cette démarche pour les « villages », en plaçant à nouveau quelques * agrégats dans l'espace, cette fois constitués d'une dizaine * de foyers paysans. On peut alors disperser, de manière entièrement aléatoire, tous les foyers paysans qui n'ont pas encore été localisés dans l'espace du modèle, c'est-à-dire ceux qui ne font pas partie des agrégats précédemment créés.

*. Ce nombre est paramétrable.

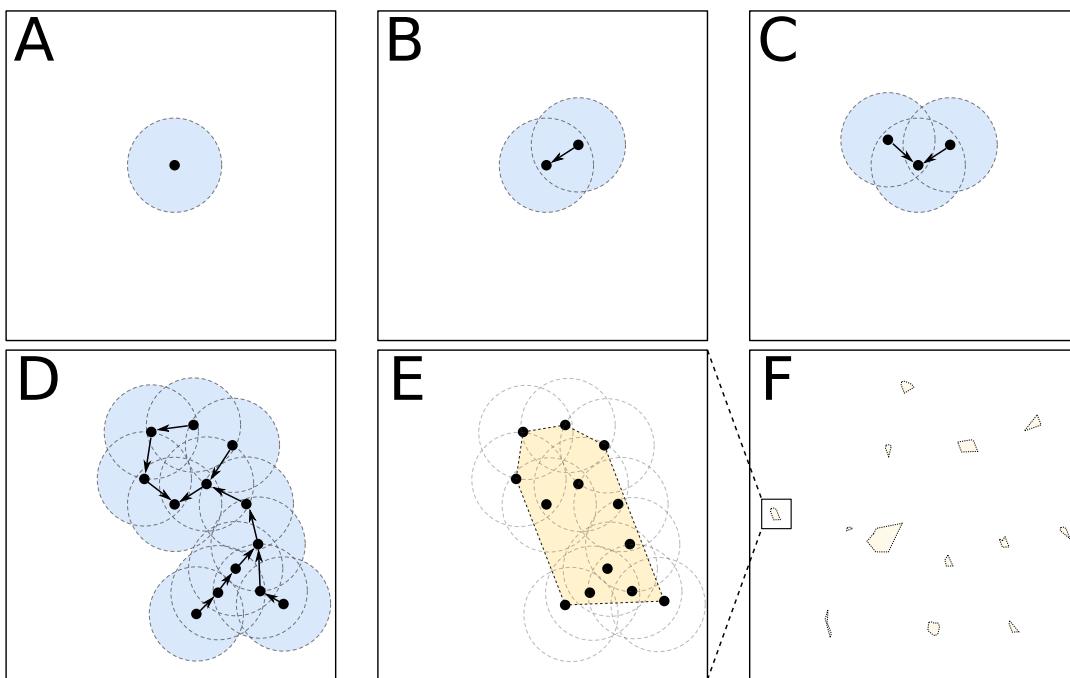


FIGURE 2.7 – Étapes successives de l’initialisation des foyers paysans agrégés (petites villes et villages).

- (A) On génère un foyer paysan qui est positionné de manière aléatoire ;
- (B) on génère un nouveau foyer paysan dans un rayon donné du premier ;
- (C) et (D) on continue à générer de nouveaux foyers paysans dans le rayon de n’importe lequel des foyers existants ;
- (E) la géométrie d’un agrégat correspond à l’enveloppe convexe des foyers paysans ;
- (F) en fin d’initialisation, les étapes A à E ont été répétées pour le nombre d’agrégats initiaux défini, et l’ensemble des agrégats sont donc dispersés dans l’espace actif (voir figure 2.4) du modèle.

Seigneurs Parmi les seigneurs, on distingue deux types : les grands seigneurs, sans représentation spatiale, et les petits seigneurs, localisés dans l'espace du modèle, toujours au sein d'un agrégat. L'initialisation spatiale des seigneurs ne concerne donc que les petits seigneurs, dont on estime empiriquement le nombre initial à une vingtaine *.

À l'initialisation de SimFeodal, on répartit ces seigneurs dans l'espace du modèle, d'une manière aléatoire contrainte dans la mesure où il s'agit de les positionner dans un des agrégats créés à l'étape précédente. Pour chaque seigneur, un premier tirage aléatoire est donc effectué pour déterminer dans quel agrégat il est situé, et un deuxième tirage pour le placer au sein de la délimitation de cet agrégat. Plusieurs seigneurs peuvent ainsi être situés dans le même agrégat, et certains agrégats peuvent de la même manière ne contenir aucun seigneur.

2.5.2 Paramètres d’initialisation

Dans la partie précédente, on a plusieurs fois indiqué que certaines des valeurs numériques de l'initialisation étaient paramétrables, c'est-à-dire qu'on peut les faire varier afin de générer des structures spatiales initiales différentes à l'échelle macrogéographique. Cela participe à la recherche de caractérisation de l'espace support initial de SimFeodal, où il n'y a pas d'« *input* » en tant que telle, mais un ensemble de paramètres qui influent sur les différents sous-

modèles (voir section 2.6). Pour l'initialisation, les paramètres sur lesquels on peut jouer pour tester différents scénarios sont précisés dans le tableau 2.3.

Sous-mécanisme	Paramètre	Intitulé	Valeur
Création du « monde » du modèle	Dimension	taille_cote_monde	80 km
Génération des Foyers Paysans (FP)	Nombre total de FP	init_nb_total_fp	4000
	Nombre de petites villes	init_nb_agglos	8
	Nombre de FP par petite ville	init_nb_fp_agglo	30
	Nombre de villages	init_nb_villages	20
	Nombre de FP par village	init_nb_fp_village	10
	Distance d'agrégation des FP	distance_detection_agregat	100 m
	Taux de FP « dépendants » (ie. non mobiles)	proba_fp_dependant	20%
Génération des Églises	Nombre total d'églises	init_nb_eglises	150
	(dont) Nombre d'églises paroissiales	init_nb_eglises_paroissiales	50
Génération des Seigneurs	Nombre de Grands Seigneurs	init_nb_gs	2
	Puissance relative des Grands Seigneurs ²	puissance_grand_seigneur1 [...] puissance_grand_seigneurN	50%
	Nombre de Petits Seigneurs	init_nb_ps	18

TABLEAU 2.3 – Paramètres permettant de contrôler l'initialisation du monde de Sim-Feodal.

Problème de numérotation interrompue des notes de bas de page

!

2. Ces paramètres sont plus spécifiques que les autres présentés ici et n'ont pas été introduits avant. Ils conditionnent la part des loyers que les grands seigneurs collectent. Voir la figure 2.17, dans la section 2.7.4.1, p. 90.

2.6 Données en entrée – *Input data*

L’initialisation de SimFeodal constitue un sous-mécanisme à part entière, entièrement endogène au modèle. À ce titre, on ne peut dire que des données en entrée (*inputs*) contrôlent l’état initial du modèle, tel que c’est la norme dans des modèles spatiaux classiques (cf. section 2.5). Pour autant, on peut voir une forme d’*inputs* dans les nombreux paramètres mobilisés pour l’initialisation et dans ceux, plus nombreux encore, qui influencent l’ensemble des mécanismes.

Par exemple, pour mettre en place des comportements exogènes permettant de faire varier le modèle à différentes dates précises, on peut classiquement faire appel à des données de sortie d’un autre modèle, ou à un fichier de configuration. Dans SimFeodal, cette logique est bien présente, mais est générée directement au sein du modèle, sans faire appel à des données externes. Certains paramètres prennent ainsi la forme de tableaux d’associations (aussi appelés dictionnaires, ou « map » en informatique), qui mettent en correspondance des valeurs de paramètres à des dates précises (voir code 2.1).

```
map<int,int> dist_min_eglide <- [800::5000, 960::3000, 1060::1500];
map<int,int> dist_max_eglide <- [800::25000, 960::10000, 1060::5000];
```

CODE 2.1 – Deux exemples de `map` dans Gama. À partir de 800, les églises doivent se situer entre 5 et 25 km, puis entre 3 et 10 km de 960 à 1060, et entre 1.5 et 5 km après cette date.

Quand bien même ce n’est pas le sens traditionnel d’*inputs*, la multiplicité des paramètres et leur forte diversité (voir chapitre 4) remplit le même rôle. Il s’agit de contrôler précisément l’initialisation du modèle, mais aussi des éléments et événements indispensables, sur le plan empirique, qui ne doivent pas émerger des interactions du modèle, mais au contraire, les conditionner.

2.7 Mécanismes spécifiques – *Submodels*

2.7.1 Introduction

Cette partie du chapitre est plus technique, et vise à présenter précisément différents mécanismes de SimFeodal évoqués dans la partie relative au fonctionnement général du modèle (section 2.3). Nous avons fait le choix de présenter les mécanismes sous la forme, discursive et schématique, la plus courte et compréhensible possible, quand bien même cette forme n’est qu’un « modèle » de la réalité de l’implémentation : les formalismes, souvent graphiques, empruntés ici ne peuvent entièrement correspondre à l’implémentation effective en lignes de code. De la même manière qu’une traduction d’une langue à une autre ne peut transcrire toutes les nuances originelles (*traduttore, traditore*), le passage d’une suite d’instruction algorithmiques à un formalisme plus accessible, comme les schémas qui suivent dans cette partie, ne peut ainsi se faire sans quelques approximations. Ces écarts entre présentation discursive des mécanismes et implémentation effective sont discutés dans l’encadré 2.2.

Dans un objectif de lisibilité, on a en effet choisi de ne pas entreprendre une description détaillée et exhaustive de tous les détails d’implémentation.

Il nous semble que ces éléments présentent un intérêt fondamental en termes de reproductibilité, mais qu'une description très précise présenterait aussi un caractère redondant avec le code-source du modèle. Celui-ci est disponible publiquement³ et à notre sens, est partie intégrante de ce travail de thèse. Sa reproduction à l'écrit, dans ces pages, même sous forme d'annexe, nous semble assez peu appropriée, mais cela n'enlève rien, de notre point de vue, à la nécessité de sa consultation pour une compréhension plus fine du modèle.

On remarquera enfin que nous avons préféré présenter ces mécanismes spécifiques dans un ordre différent de celui de l'ordonnancement dans le modèle (cf. figure 2.6), en les regroupant plutôt suivant les types d'agents concernés par chacun. On présentera d'abord les mécanismes « globaux », c'est-à-dire relevant de la détection des agrégats, des pôles et des logiques de promotion et création de paroisses ; puis les mécanismes relatifs au foyers paysans ; et enfin ceux impliquant l'action des seigneurs.

Encadré 2.2 : Écarts entre présentation et implémentation

La présentation des mécanismes d'un modèle ne suit pas toujours la manière dont ces mécanismes sont implementés dans le code-source d'un modèle. C'est naturellement vrai entre deux « domaines » d'un modèle (si l'on reprend la triade des domaines conceptuels, empirique et informatique de SARGENT (2009, p. 3, fig. 2)) (**Lena : à reproduire quelque part dans la thèse**), au vu des écarts qu'il peut y avoir par exemple entre le modèle conceptuel et le modèle implanté. Toutefois, cela peut aussi se produire au sein d'un même domaine, par exemple ici pour le domaine du modèle informatique (« computerized model » chez Sargent), notamment dans la phase de l'implémentation. La présentation discursive d'un modèle suit ses règles propres, par exemple la nécessité de suivre une progression linéaire. L'implémentation informatique, au contraire, ne suit pas forcément les mêmes règles, et tend même à requérir des logiques très différentes au nom d'une « optimisation » du code-source, propre à chaque langage informatique. Dans cet encadré, nous souhaitons mettre en avant trois types de processus où la présentation discursive et l'implémentation effective sont différentes tout en menant à des aboutissements équivalents. Cette typologie ne vise pas l'exhaustivité, mais s'articule autour d'exemples rencontrés dans la présentation du modèle qui est faite dans ce chapitre.

Point de vue de l'implémentation Quand un tirage aléatoire probabiliste est appliqué sur un grand nombre d'entités, son espérance théorique tend vers une fréquence empirique, en vertu de la loi des grands nombres. En simulation à base d'agents, cela signifie que choisir une proportion de 10% d'une large population (ce que l'on pourrait qualifier de « probabilité de groupe ») est quasi-équivalent à doter chacun des individus d'une probabilité de 0.1 d'être choisis (ce qui correspond à une « pro-

3. À l'adresse <https://github.com/SimFeodal/SimFeodal>, voir l'avant-propos

babilité individuelle »). Cette équivalence est fortement mobilisée dans SimFeodal, le « point de vue » – probabilité individuelle ou de groupe – changeant parfois à plusieurs reprises dans un même mécanisme, selon la praticité ou la performance (informatique) de l'une ou l'autre. Dans la description du modèle, l'objectif, pour des raisons de clarté, est d'avoir la vision la plus « agent-centrée » possible. On présentera préférentiellement les mécanismes comme faisant appel à des probabilités individuelles, quand bien même l'implémentation effective se base sur une approche proportionnelle, mobilisant des probabilités de groupe.

Factorisation Un autre écart entre description et implémentation tient à l'ordre d'exécution des sous-mécanismes par un ensemble d'agents. En mathématiques, $k \times (x + y)$ est égal, selon les règles de factorisation, à $k \cdot x + k \cdot y$. Dans un système multi-agents, la logique est la même. On considère ainsi que même si l'ordre d'appel des agents diffère lors de l'implémentation d'un sous-mécanisme donné, ce qui peut faire varier le résultat, les sous-mécanismes décrits sont équivalents (plutôt qu'égaux). Les programmes 2.2 et 2.3 sont ainsi considérés comme équivalents en dépit de la différence dans leur ordre d'appel. Le premier programme demande à tous les agents, chacun leur tour, d'effectuer les mécanismes A et B successivement. Le second est légèrement différent en ce qu'il demande d'abord à tous les agents d'effectuer A, et une fois que A est réalisé pour chacun, d'effectuer B :

```
ask agents [
    do A;
    do B;
]
```

CODE 2.2 – Factorisé

```
ask agents [
    do A; ]
ask agents [
    do B; ]
```

CODE 2.3 – Développé

En termes d'efficacité du code, l'alternance entre ces deux approches permet de résoudre certaines difficultés d'implémentation. On peut ainsi factoriser les calculs légers et au contraire développer les calculs plus lourds, par exemple pour faciliter l'enregistrement de variables intermédiaires liées à l'itération. En revanche, pour bien différencier les étapes successives, dans le cadre d'une description discursive, il sera souvent plus aisé de présenter les sous-processus de manière développée plutôt que factorisée.

Optimisation Les deux types de processus précédents peuvent être combinés, pour répondre à des questions d'optimisation informatique, par exemple pour permettre au modèle de fonctionner plus rapidement en fonction des spécificités des langages informatiques choisis. Dans Gama, par exemple, il est plus lent, informatiquement, de calculer la distance depuis 1000 agents à 10 agents, que l'inverse, quand bien même les résultats sont strictement identiques. Le calcul de la satisfaction de protection des foyers paysans en offre un exemple. Il requiert de mesurer la distance de chaque agent concerné au château le plus proche. Il

est bien plus rapide de calculer cette mesure depuis les châteaux, puis de sélectionner la distance minimale pour chaque couple (foyer paysan ; château). Dans cet exemple, l'implémentation se fait dans un sens opposé à celui du discours, sans que cela ait la moindre conséquence sur le plan conceptuel. Il en résulte toutefois une bien meilleure optimisation du modèle informatique en termes de rapidité d'exécution.

2.7.2 Mécanismes globaux

Dans cette sous-partie, nous présentons le détail des mécanismes « globaux », c'est-à-dire des mécanismes qui sont exécutés au niveau global du modèle, et non au niveau des agents (voir le paragraphe dédié dans l'introduction de section 2.3).

Même s'ils ne résultent pas de comportements des agents, ces mécanismes sont indispensables au modèle en ce qu'ils dessinent le contexte spatial dans lequel les agents-foyers paysans évolueront et seront en interaction. À ce titre, ces mécanismes ont une influence très importante sur le déroulé du modèle, et ont donc été changés, adaptés et améliorés de nombreuses fois. Cette forte évolutivité se transcrit par des mécanismes parfois très spécifiques, dont les étapes peuvent être nombreuses, de même que les cas particuliers.

2.7.2.1 Identification des agrégats

La figure 2.8 présente les étapes successives de détection des agrégats. À chaque pas de temps, on repart d'une situation « neutre », c'est-à-dire que tous les foyers paysans sont considérés comme dispersés (A). On exécute un algorithme de classification basé sur la distance⁴ : les *clusters* constitués d'au moins 5 foyers paysans espacés de moins de 100 m sont considérés comme des agrégats(B). On fixe alors la géométrie des agrégats, qui prend la forme de l'enveloppe convexe des foyers paysans qui les composent (C). Les foyers paysans inclus dans la surface d'un agrégat y sont ajoutés (D).

4. L'opérateur Gama `simple_clustering_by_distance`, proche conceptuellement de l'algorithme DBSCAN.

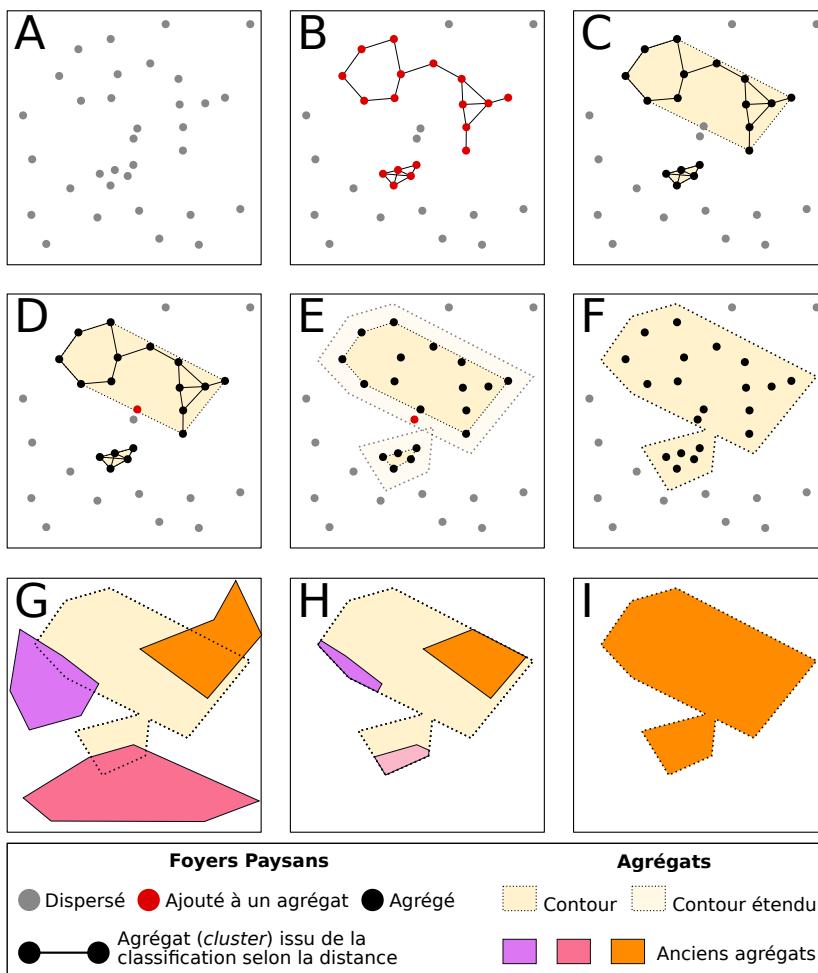


FIGURE 2.8 – Détection des agrégats et identification de leur « héritage ».

On crée ensuite des *buffers* de 100 m autour des agrégats et on y rattache à nouveau les foyers paysans inclus dans la surface (E). Dernière étape dans la détection des agrégats, pour ne pas multiplier les agrégats proches les uns des autres, on procède à une étape de fusion : on réalise l’union géométrique des agrégats qui s’intersectent (F).

Les trois dernières étapes concernent la transmission des propriétés des agrégats à travers les pas de temps, et en particulier de la présence ou non d’une communauté en leur sein. On isole les agrégats du pas de temps précédent qui intersectent les nouveaux agrégats (G). On procède ensuite à une intersection entre les géométries de ces anciens agrégats et le nouvel agrégat (H). Le nouvel agrégat hérite alors des propriétés de l’ancien agrégat dont la superficie d’intersection est la plus importante, c’est-à-dire l’agrégat orange ici (I).

2.7.2.2 Identification des pôles

Les pôles sont des agents composés d’attracteurs de trois types (cf. figure 2.2-A) : les châteaux (petits et gros), les églises (dotées de droits paroissiaux) et les agrégats (comportant une communauté paysanne). Notons que les églises simples ou les agrégats ne comportant pas de communauté villageoise ne sont pas considérés comme des attracteurs. Les pôles et leur délimitation spatiale revêtent une importance particulière lors de la migration des foyers paysans : ils attirent d’autant plus que leur attractivité est importante, et le cas échéant, les foyers paysans migrants s’installent à l’intérieur de leur délimitation. La figure 2.9 illustre la méthode de définition spatiale des pôles, ainsi que

des exemples de calcul de leurs attractivités.

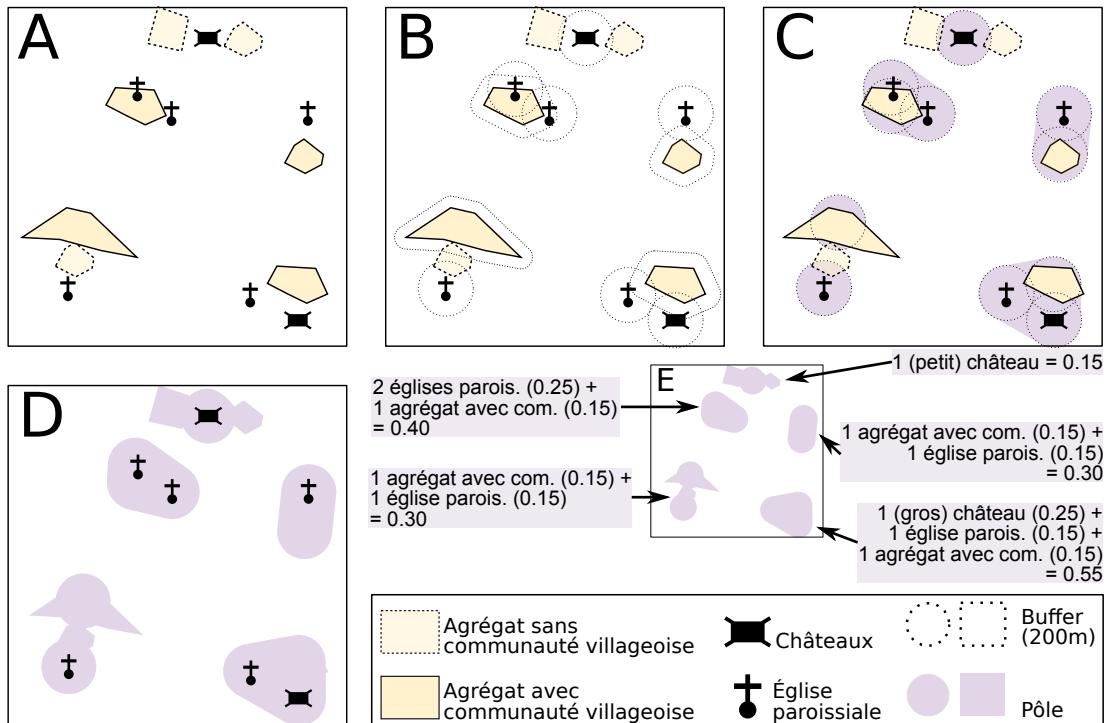


FIGURE 2.9 – Les étapes du mécanisme de détection et de calcul d'attractivité des pôles.

À chaque pas de temps, on repart d'une situation « neutre », c'est-à-dire que l'on recalcule systématiquement les pôles sans repartir des pas de temps précédents (A). On commence par identifier les attracteurs situés à moins de 200 m les uns des autres (B) pour identifier les pôles : ceux-ci peuvent être constitués de plusieurs attracteurs proches, ou d'un unique attracteur. L'enveloppe spatiale des pôles est définie comme un *buffer* de 200 m autour de l'enveloppe convexe formée par le centroïde des attracteurs qui les composent (C). Il s'agit par conséquent d'un cercle de rayon de 200 m pour les pôles mono-attracteurs, et d'un polygone pour les pôles composite. Pour que les agrégats proches d'un pôle soient bien identifiés comme en faisant partie, on fusionne (union géométrique) l'enveloppe spatiale des pôles avec les contours de l'ensemble des agrégats (comportant ou non une communauté paysanne) intersectés. Cela permet à des pôles peu éloignés de fusionner à leur tour (D). On peut alors calculer leur attractivité en se reportant au tableau 2.4 (E).

Attracteur	Détail	Attractivité
Châteaux	Petit	0.15
	Gros	0.25
Église paroissiale	1	0.15
	2	0.25
	3	0.5
	4 +	0.6
Agrégat (doté d'une communauté)		0.15

TABLEAU 2.4 – Attractivité ($\in [0, 1]$) conférée aux pôles par leurs attracteurs.

2.7.2.3 Crédit et promotion d'églises paroissiales

Dans les zones peu denses, c'est-à-dire hors agrégat, de nouvelles églises paroissiales peuvent apparaître soit par promotion, soit par création. Dans le premier cas, c'est une église existante, qui n'a pas les droits paroissiaux, qui sera promue et deviendra alors église paroissiale. Dans le second cas, c'est-à-dire quand il n'y a pas d'église non paroissiale qui satisfasse aux critères spatiaux, une nouvelle église est créée et directement dotée des droits paroissiaux.

Dans les zones faiblement peuplées, c'est-à-dire là où peu d'agrégats sont présents, la population des foyers paysans doit aussi être desservie par des églises paroissiales afin que leur satisfaction religieuse demeure correcte. Quand une paroisse comporte plus de 20 foyers paysans insatisfaits sur le plan religieux, elle cherche à se subdiviser en créant une nouvelle église paroissiale. Celle-ci peut être une église non dotée de droits paroissiaux qui se verrait promu, ou donner lieu à la création d'une nouvelle église, directement dotée de droits paroissiaux. Les paragraphes suivants résument les différentes manières de renforcer le maillage paroissial, autour de l'exemple de quatre paroisses insatisfaites (A, B, C et D, voir figure 2.10).

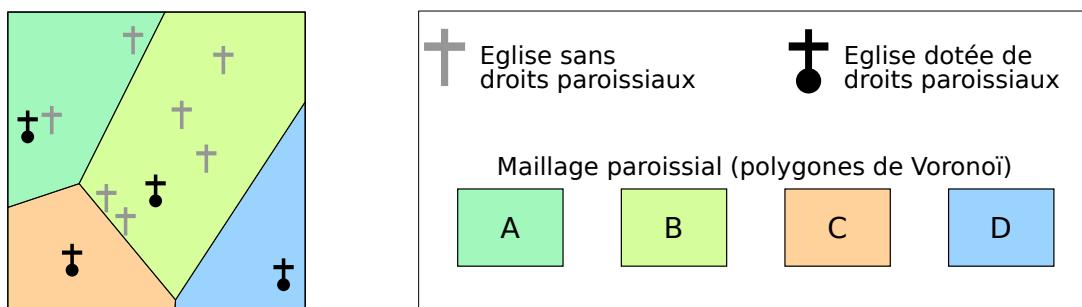


FIGURE 2.10 – Quatre exemples de paroisses insatisfaites.

Promotion d'églises paroissiales en présence d'églises non paroissiales. Les deux paroisses situées en haut de cet exemple (A et B) contiennent chacune des églises non paroissiales dont l'une pourra être promue en église paroissiale (figure 2.11).

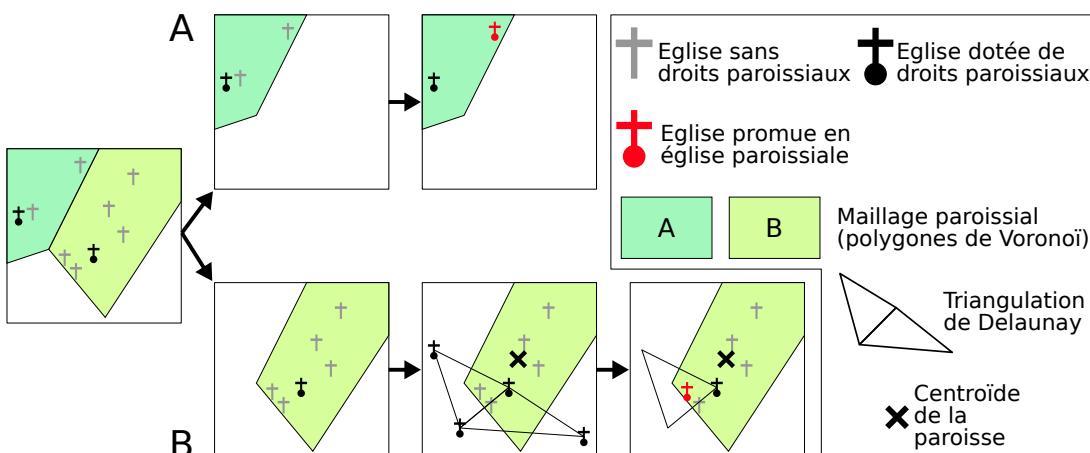


FIGURE 2.11 – Promotion d'églises paroissiales avec églises non paroissiales.

- S'il y a au plus 3 églises non paroissiales disponibles dans la maille de la paroisse (A), on en sélectionne une aléatoirement et on la promeut en église paroissiale.

- S'il y a plus de trois églises non paroissiales disponibles (**B**), on commence par réaliser une triangulation de Delaunay autour des églises paroissiales (les églises **A**, **B**, **C** et **D**, visibles dans la figure 2.10).

On conserve le triangle résultant qui est le plus proche du centroïde de la paroisse.

On promeut en église paroissiale l'église la plus proche du centre de ce triangle.

Paroisses sans églises non paroissiales. Les deux paroisses situées en bas (**C** et **D**) de l'exemple ne contiennent pas d'églises non paroissiales (figure 2.12).

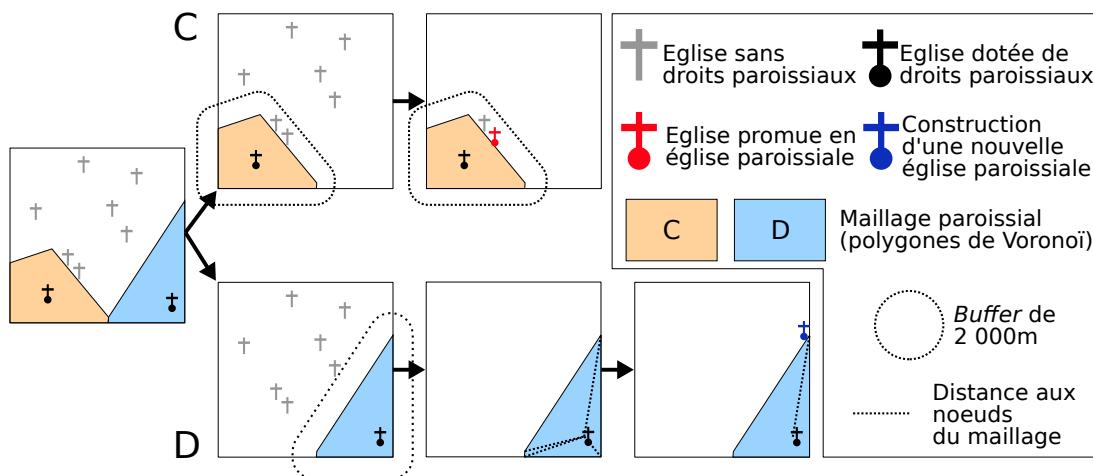


FIGURE 2.12 – Promotion et création d'églises paroissiales sans églises non paroissiales.

Dans ce cas, on cherche les églises non paroissiales situées dans un rayon de 2 000 m autour de la paroisse.

- Si des églises non paroissiales sont présentes dans ce *buffer* (**C**), on en sélectionne une de manière aléatoire et on lui attribue des droits paroissiaux : cette église devient paroissiale.
- S'il n'y a aucune église non paroissiale dans ce *buffer* de 2 000 m (**D**), on bâti une nouvelle église.
Cette-ci sera localisée sur le sommet du polygone paroissial le plus éloigné de l'église paroissiale existante.

2.7.3 Foyers paysans

2.7.3.1 Satisfaction et modèles gravitaires

Les satisfactions religieuses et de protection des foyers paysans suivent une logique proche du modèle gravitaire : plus les foyers sont éloignés des « attracteurs » (les châteaux pour la satisfaction « protection » ; les églises paroissiales pour la satisfaction religieuse), moins ils sont satisfaits. Cette logique simple est légèrement contrainte par l'introduction de seuils : en dessous d'une certaine distance (*distance_min*), le foyer paysan est entièrement satisfait (satisfaction = 1), et au delà d'une autre distance (*distance_max*), sa satisfaction est nulle

(satisfaction = 0). Entre ces deux seuils, minimal et maximal, la satisfaction suit une logique gravitaire simple, soit ici une décroissance linéaire. L'équation 2.1 permet de formaliser ce type de calcul, et la figure 2.13 illustre de manière simple cette relation.

$$satis_dist = \min \left[\max \left[\frac{(distance_max - distance_attracteur)}{(distance_max - distance_min)}; 0 \right]; 1 \right] \quad (2.1)$$

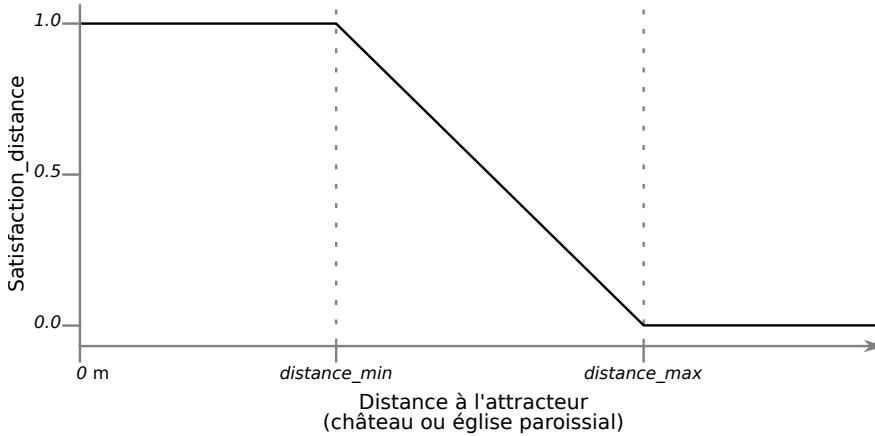


FIGURE 2.13 – Variation de la satisfaction en fonction de la distance à l'attracteur le plus proche.

Satisfaction religieuse Le calcul de la satisfaction religieuse s'inscrit rigoureusement dans cette logique. On peut le formuler ainsi :

$$s_{religieuse} = \min \left[\max \left[\frac{(distance_{max} - distance_{eglise})}{(distance_{max} - distance_{min})}; 0 \right]; 1 \right]$$

avec des seuils de distance ($distance_{max}$ et $distance_{min}$) qui évoluent au cours du temps de telle manière :

- avant 960 : $distance_{min} = 5$ km et $distance_{max} = 25$ km
- de 960 à 1060 : $distance_{min} = 3$ km et $distance_{max} = 10$ km
- après 1060 : $distance_{min} = 1,5$ km et $distance_{max} = 5$ km

Ces seuils, tenant compte de l'évolution de la vitesse des déplacements et de l'augmentation de la fréquence obligatoire de visite des églises paroissiales, ont été déterminés par les archéologues participant au projet.

Satisfaction « protection » La satisfaction « protection » mobilise une logique proche, c'est-à-dire qu'elle est fonction de la distance au château le plus proche. Cette distance est ici pondérée par un paramètre ($besoin_protection$) qui permet de prendre en compte la sensibilité des foyers paysans au climat de violence, lequel tend à augmenter pendant la période.

$$s_{protection} = (s_{distance_chateau})^{(besoin_protection)}$$

avec

$$s_{distance_chateau} = \min \left[\max \left[\frac{(dist_{max} - distance_chateau)}{(dist_{max} - distance_{min})}; 0.01 \right]; 1 \right]$$

($dist_{min} = 1,5 \text{ km}$ et $dist_{max} = 5 \text{ km}$) et un paramètre de sensibilité évoluant au cours du temps (*besoin_protection*) :

- avant 960 : $besoin_protection = 0$
- de 960 à 1020 : $besoin_protection = 0.2; 0.4; 0.6; 0.8$
- après 1020 : $besoin_protection = 1$

Satisfaction matérielle La satisfaction matérielle ne prend aucune distance en compte : elle s'appuie sur le montant des taxes dont le foyer paysan doit s'acquitter (*redevance_acquittees*). Ce montant est pondéré par un paramètre technique représentant un niveau « acceptable » de taxation (*coef_redevances*, qui vaut 15 ici, c'est-à-dire qu'un foyer paysan s'acquittant de 15 droits ou plus aura une satisfaction matérielle de 0).

L'appartenance du foyer paysan à une communauté permet aussi de pondérer l'influence des redevances acquittées : plus le paramètre *puissance_communauté* est important, moins la satisfaction matérielle du foyer paysan sera affectée par les droits dont il s'acquitte. La valeur de ce paramètre est par ailleurs évolutive : elle augmente au fur et à mesure de la période modélisée⁵. Cela permet d'intégrer le rôle croissant, empirique, des communautés paysannes.

$$s_{materielle} = (s_{redevance})^{(1-puissance_communaute)}$$

avec

$$s_{redevance} = \max \left[\left(1 - \frac{redevances_acquittees}{coef_redevances} \right); 0 \right]$$

Satisfaction générale La satisfaction générale est mesurée à partir du minimum de ces satisfactions individuelles. Ce choix traduit l'hypothèse que ces satisfactions ne s'équilibrivent pas, une « satisfaction protection » forte ne compensant pas une forte insatisfaction religieuse par exemple. En revanche l'appartenance du foyer paysan à une communauté paysanne intervient directement dans la satisfaction générale, cette appartenance tendant à l'augmenter. L'appartenance à une communauté paysanne intervient ainsi à deux reprises dans le calcul de la satisfaction, une fois dans le calcul de la satisfaction matérielle et ensuite dans le calcul de la satisfaction générale. Ce choix permet de tenir compte du poids que prennent ces structures sociales et institutionnelles au cours de la période modélisée.

Le calcul de la satisfaction s'exprime ainsi :

$$\begin{aligned} satisfaction &= 0.75 \times [\min(s_{materielle}; s_{religieuse}; s_{protection})] + \\ &\quad 0.25 \times [appartenance_communaute] \end{aligned}$$

avec $\{satisfaction; s_{materielle}; s_{religieuse}; s_{protection}\} \in [0, 1]$ et $[appartenance_communaute] \in \{0; 1\}$

5. *puissance_communauté* vaut 0.2 jusqu'en 1060, puis augmente de 0.2 à chaque pas de temps pour atteindre 1 en 1040 et rester à ce niveau.

2.7.3.2 Migration des foyers paysans

La migration des foyers paysans est sans doute le mécanisme le plus complexe et ayant subi les plus fortes évolutions depuis la conception de SimFeodal. La règle d'ensemble est pourtant extrêmement simple : un foyer paysan a une probabilité de migrer qui est proportionnelle à son insatisfaction. Autrement dit, $P(\text{migration}) = (1 - \text{satisfaction})$. Cette règle simple a été progressivement complexifiée afin d'augmenter à la fois la rationalité et l'ancrage empirique des choix de localisation. Cette complexification du mécanisme est inhérente au choix de modélisation, KIDS, dans lequel SimFeodal s'inscrit (cf. chapitre 1), et où l'on cherche à suivre autant que possible les connaissances empiriques, quitte à complexifier plus que de nécessaire (par rapport au niveau de détail des autres mécanismes) certaines règles.

Une première complexification a abouti à la distinction de migrations « locales » et de migrations « lointaines » (voir figure 2.14).

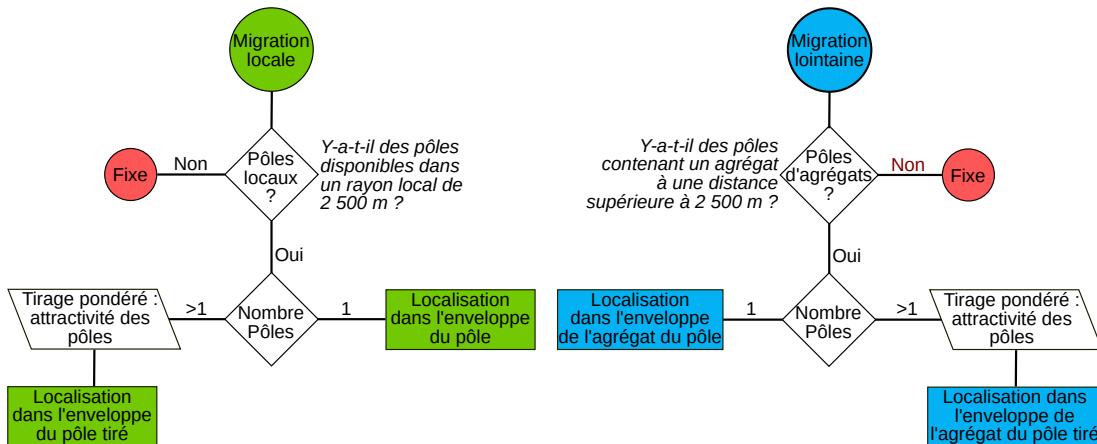


FIGURE 2.14 – Migrations locales et lointaines.

Pour aboutir à cette différence entre migration locale et migration lointaine, la règle est que les foyers paysans privilégient les migrations locales. Quand celles-ci ne sont pas possibles, ils ont une probabilité (plus faible) d'effectuer une migration lointaine. Afin de prendre en compte les connaissances empiriques sur la migration des foyers paysans de cette époque, nous avons introduit une légère différence de comportement entre les foyers paysans déjà agrégés et ceux qui sont dispersés lors de l'exécution du mécanisme de migration (figure 2.15). On a ainsi considéré, d'après les connaissances empiriques, qu'un foyer paysan déjà agrégé cherchait un agrégat potentiellement plus attractif, afin de voir sa satisfaction augmenter, alors qu'un foyer paysan dispersé cherchait avant tout à rejoindre un agrégat, en faisant preuve de moins de difficulté dans son choix.

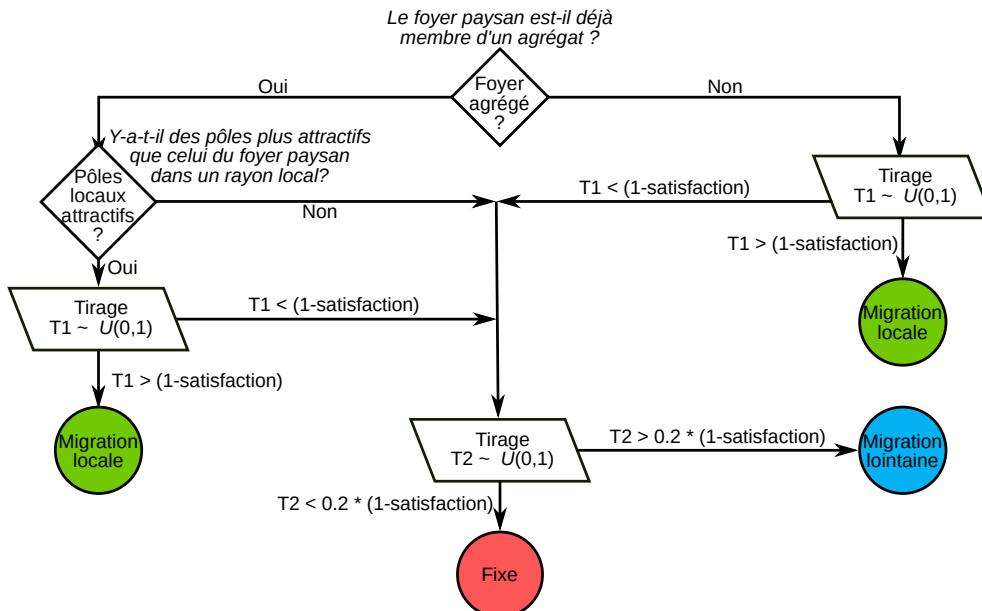


FIGURE 2.15 – Décision de migration.

Une dernière distinction a été opérée entre les foyers paysans classiques, libres de leurs choix migratoires, et les foyers paysans « dépendants ». Ces derniers représentent les foyers qui n'ont pas le droit de quitter le domaine de leur seigneur (les serfs entre autres). Ceux-là ne peuvent effectuer que des migrations locales, et on considère qu'ils seront amenés à migrer plus facilement, les migrations locales ayant un « coût » moindre pour le foyer paysan.

Cette nouvelle distinction, comme les précédentes, s'inscrit encore dans le processus de modélisation KIDS : pour les thématiciens, la distinction entre foyers paysans « mobiles » et foyers paysans « dépendants » est importante empiriquement, et devait être prise en compte dans le modèle. Le mécanisme spécifique de migration des foyers paysans dépendants est présenté dans la figure 2.16.

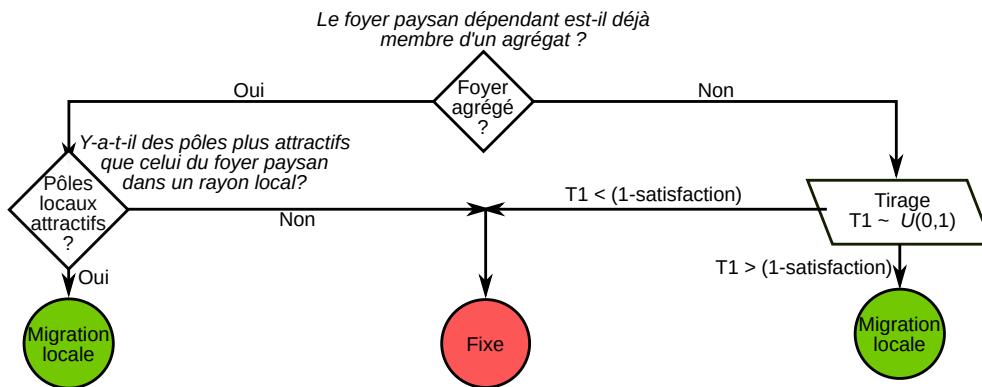


FIGURE 2.16 – Décision de migration des foyers paysans dépendants.

2.7.4 Seigneurs

2.7.4.1 Prélèvement des droits

Les seigneurs, petits et grands, collectent les droits dont doivent s'acquitter les foyers paysans (droits de haute justice et autres droits) majoritairement (exception faite des droits fonciers pour les grands seigneurs, voir figure 2.17) par l'intermédiaire des zones de prélèvement. Ces zones sont caractérisées par

un propriétaire (le seigneur qui les possède), éventuellement un gardien (le seigneur à qui la zone a été « donnée », voir section 2.3.10), une localisation²⁶, un rayon²⁷ et un taux de prélèvement²⁸.

Les prélèvements, selon les types de droits, rapportent de la « puissance » aux seigneurs, dont le tableau 2.5 donne une référence.

Type de droit	Fonction du seigneur	Puissance acquise par foyer paysan
Haute Justice	Propriétaire ou Gardien Souverain (zone donnée)	2 2.5
Droits fonciers	Propriétaire ou Gardien Souverain (zone donnée)	1 1.25
Autres droits	Propriétaire ou Gardien Souverain (zone donnée)	0.25 0.35

TABLEAU 2.5 – Gain de puissance par foyer paysan prélevé.

Foncier Quelques petits seigneurs (tous ceux créés dès l'initialisation ainsi que $\approx 10\%$ de ceux créés pendant le déroulement de la simulation) possèdent des droits fonciers. À ce titre, ils peuvent collecter ces droits au sein d'une zone de prélèvement qu'ils créent lors de leur apparition. Le mécanisme de collecte des droits fonciers est illustré dans la figure 2.17.

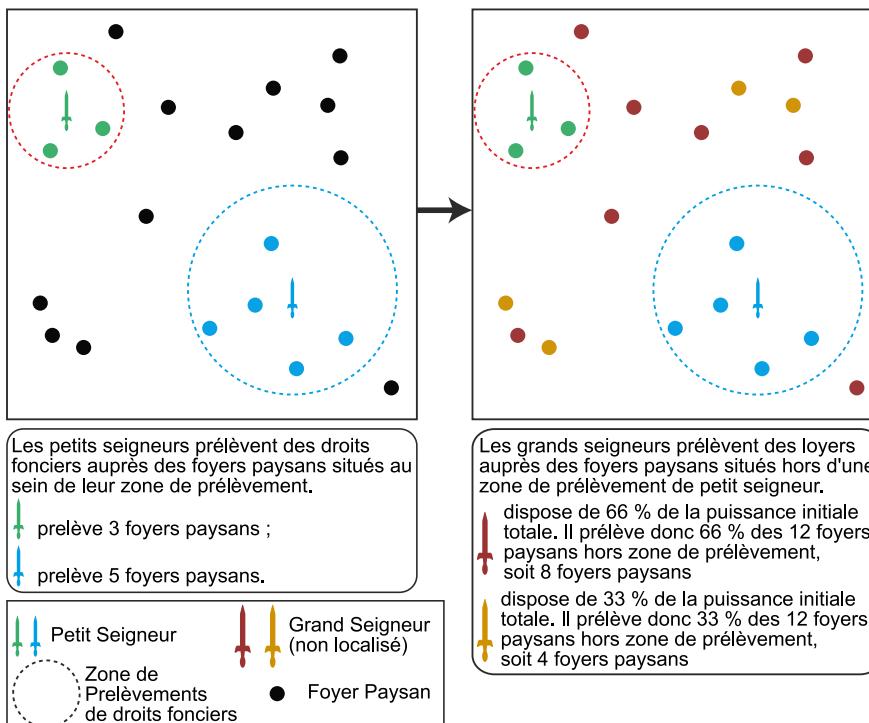


FIGURE 2.17 – Prélèvement des droits fonciers par les petits et grands seigneurs.

- 26. Pour les petits seigneurs, il s'agit de leur propre localisation
- 27. Ce rayon est tiré aléatoirement suivant une distribution uniforme, $rayon_zp \sim \mathcal{U}[rayon_min_zp_ps, rayon_max_zp_ps]$, avec $rayon_min_zp_ps$ et $rayon_max_zp_ps$ des paramètres qui valent respectivement 1 000 et 5 000 m.
N.B : zp = zone de prélèvement et ps = petit seigneur

- 28. idem : $taux_prelevement_zp \sim \mathcal{U}[min_taux_prelevement_zp_ps, max_taux_prelevement_zp_ps]$ avec $min_taux_prelevement_zp_ps$ et $max_taux_prelevement_zp_ps$ valant 5% et 25%.

Haute justice et autres droits Les autres droits suivent un mécanisme plus générique : les seigneurs propriétaires collectent des droits auprès d'une partie des foyers paysans inclus dans la surface de la zone de prélèvement. Cette partie correspond aux « taux de prélèvement » décrit plus haut. La figure 2.18 récapitule les différentes modalités de collecte de droits via les zones de prélèvement.

La partie (b) de la figure (prélèvements multiples) illustre le cas où un même seigneur possède plusieurs zones de prélèvement concentriques, et où les taux de prélèvement partiels (20% et 25% dans cet exemple) s'appliquent donc en partie aux mêmes foyers paysans. Du point de vue du foyer paysan, cela montre qu'avec ces deux zones, un même foyer paysan situé dans la zone de prélèvement de plus faible rayon peut se voir prélevé 0, 1 ou 2 droits, affectant sa satisfaction matérielle en conséquence.

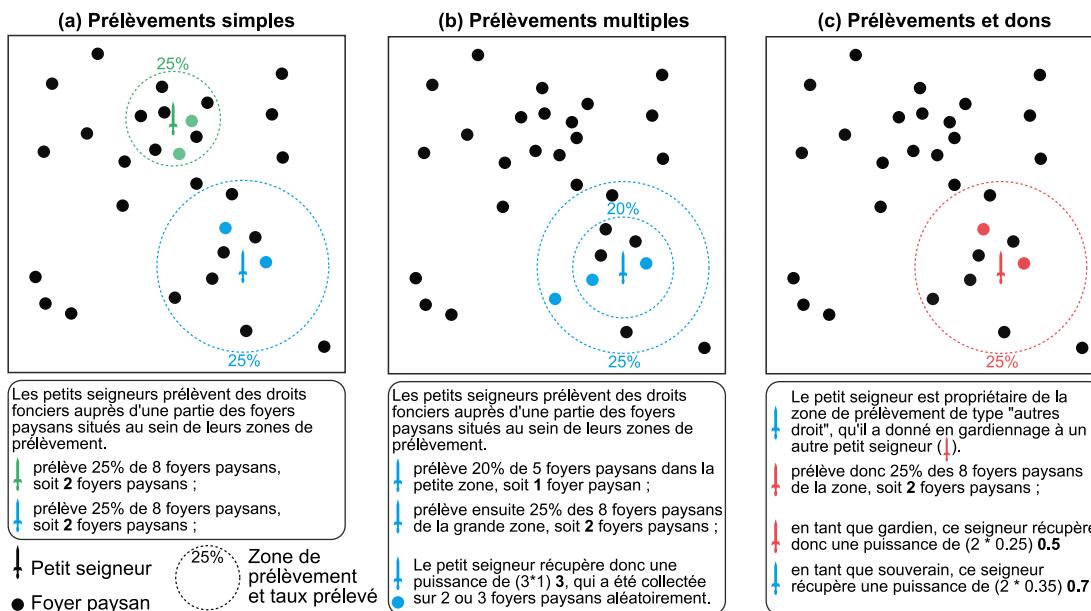


FIGURE 2.18 – Mécanisme général de prélèvement des droits par les seigneurs.

Les droits de haute justice sont prélevés exactement comme les autres droits, à la seule différence qu'ils correspondent nécessairement à des taux de prélèvement de 100%.

2.7.4.2 Construction de châteaux

À partir de 940, les seigneurs ont la possibilité de créer des châteaux, dans un espace limité par la présence d'autres châteaux : on considère ainsi, au regard des connaissances empiriques, que deux châteaux ne peuvent être espacés de moins de 5 000 mètres. Le mécanisme de construction des châteaux est commun aux grands et aux petits seigneurs, mais certains paramètres varient selon le type du seigneur considéré :

- Un grand seigneur peut construire jusqu'à 2 châteaux par tour (paramètre `nb_max_chateaux_par_tour_gs`), alors qu'un petit seigneur peut en construire au maximum 1 par pas de temps (`nb_max_chateaux_par_tour_ps`).
- Pour un seigneur i , la probabilité de construire un château est formalisée ainsi :

$$P(\text{construction}) = \frac{\text{puissance_seigneur}_i}{\sum \text{puissance_seigneur}_{0..n}} \times \text{pondération_proba_chateau}$$

avec *pondération_proba_chateau* valant 1.25 pour les grands seigneurs et 7 pour les petits (paramètres techniques).

- Les grands seigneurs peuvent construire des châteaux n'importe où dans l'espace du modèle (en respectant toutefois les règles exposées plus bas), alors que les petits seigneurs ne peuvent le faire que dans un rayon de 5 000 m de leur localisation : s'il n'y a pas d'espace disponible dans ce rayon, le petit seigneur ne crée pas de château.

Les règles de localisation de château sont identiques, et illustrées dans la figure 2.19.

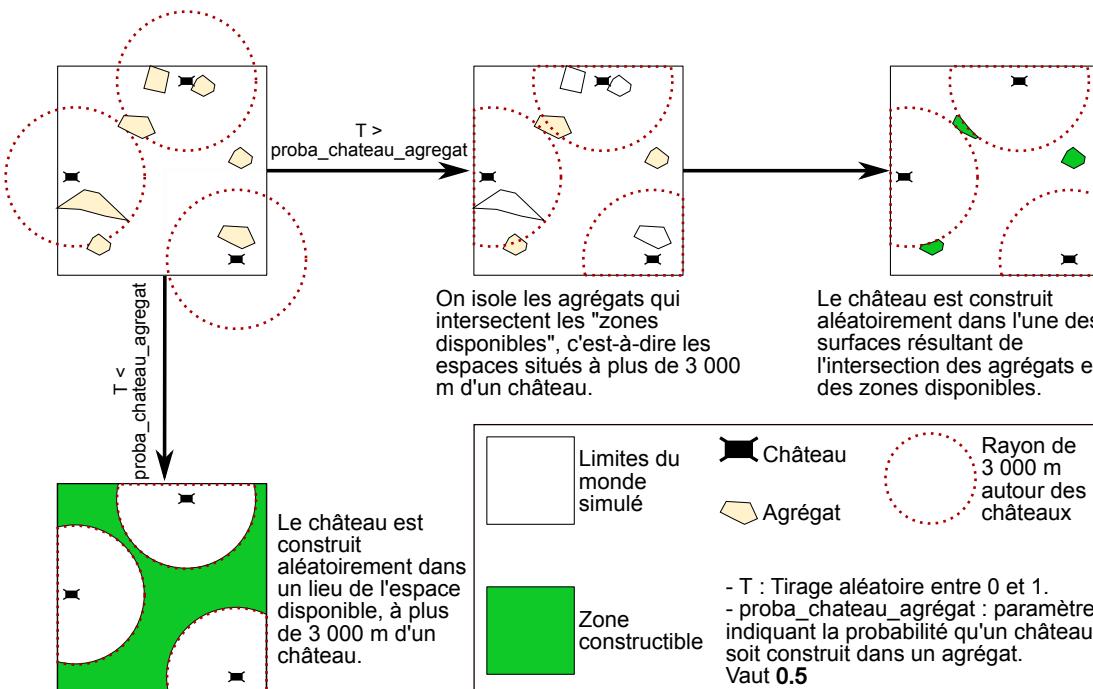


FIGURE 2.19 – Mécanisme de localisation des châteaux construits.

Rayon des zones de prélèvement associées La construction d'un château implique systématiquement la création de zones de prélèvements qui lui sont associées, c'est-à-dire qu'elles appartiennent au seigneur qui crée le château. Si le château est donné en gardiennage, l'ensemble des zones de prélèvement qui lui sont associées seront aussi données en gardiennage au petit seigneur choisi.

Les zones de prélèvement créées concernent des droits fonciers et des autres droits. Si le seigneur châtelain obtient les droits de haute justice, une zone de prélèvement de droits de haute justice sera automatiquement créée autour de chacun de ses châteaux.

Contrairement aux zones de prélèvement habituelles, celles qui sont associées à un château ont un taux de prélèvement de 100%. Cette particularité est due à l'importance thématique des châteaux, qui remplissent un rôle de protection au prix d'un investissement important. Cela implique dès lors des prélèvements plus élevés et systématiques que dans les zones plus classiques. Dans SimFeodal, cela est modélisé sous la forme de ce taux de prélèvement

supérieur à la norme, et aussi à un rayon lui aussi supérieur : il est variable et dépend de la puissance relative du seigneur qui construit le château. Ce rayon varie entre un seuil minimal de 2 000 m (*rayon_min_zp_chateau*) et un seuil maximal de 15 000 m (*rayon_max_zp_chateau*). Entre ces deux seuils, la valeur du rayon dépend d'une fonction linéaire correspondant au ratio entre la puissance du seigneur constructeur et les puissances maximales et minimales de l'ensemble des seigneurs, tel que formalisé dans l'équation 2.2.

$$\begin{aligned} \text{rayon_zp_chateau} = \\ \min [\max [\text{puissance_relative}; \text{rayon_min_zp_chateau}]; \text{rayon_max_zp_chateau}] \\ \text{avec} \\ \text{puissance_relative}_i = \frac{\max(\text{puissance}_{0..n}) - \text{puissance}_i}{\max(\text{puissance}_{0..n}) \times \min(\text{puissance}_{0..n})} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Conclusion

La dernière partie de ce chapitre, consacrée à la présentation détaillée de certains mécanismes, montre à quel point le protocole de description ODD peut être difficile à mobiliser pour des modèles descriptifs et exploratoires comme SimFeodal. En particulier, ce protocole demande de suivre un niveau homogène de présentation des propriétés et règles d'un modèle. Il est ainsi nécessaire de présenter ces règles de manière simplifiée dans un premier temps (*Process overview*, section 2.3) puis détaillée par la suite (*Submodels*, section 2.7). Cela complique la démarche d'explicitation de ces mécanismes : en voulant en simplifier la présentation, on a vite fait d'en dénaturer le fonctionnement réel.

Cette difficulté de présentation du modèle dans le cadre d'ODD est renforcée par la forte hétérogénéité, en termes de complexité²⁹, des mécanismes de SimFeodal. On en a déjà mentionné les raisons dans l'introduction : les niveaux de précision des connaissances des différents objets modélisés sont très variables, et très liés aux parcours et sujets de recherche individuels des thématiciens impliqués. Si l'on ajoute une « longue durée » de conception et de développement du modèle, qui plus est caractérisée par des allers-retours entre des phases de simplification et des phases de complexification, on ne peut qu'obtenir un modèle difficile à homogénéiser. Tous ces éléments sont toutefois caractéristiques de la nature – et de la vocation – exploratoire de SimFeodal, dont le développement porte sans doute plus de résultats que l'utilisation d'un état « final ».

En dépit de cette forte hétérogénéité dans les mécanismes, il nous semble toutefois important de pointer aussi la certaine généricité qui en caractérise les fondations. Par exemple, le calcul des différentes composantes de la sa-

29. Le terme complexité est ici employé au sens algorithmique, et non au sens des systèmes complexes. Une plus forte complexité désigne ici un mécanisme plus « compliqué », régit par un nombre de règles, d'étapes ou de conditions plus importantes qu'un autre.

tisfaction générale est assez similaire, autour de logiques de seuils minimum et maximum entre lesquels la satisfaction suit une logique linéaire. Cette logique prédominait initialement dans de nombreux autres mécanismes (probabilité de construction de châteaux, probabilité de créer de nouvelles églises paroissiales...), de même qu'une certaine logique gravitaire dans le choix des destinations de migration des foyers paysans.

Les nombreuses versions successives du modèle ont entraîné des spécifications de ces mécanismes autrefois très génériques, spécifications qui peuvent en masquer une logique initiale qui demeure cependant bien présente et que nous avons parfois essayé de rappeler. Par exemple, les mécanismes de migration des foyers paysans (section 2.7.3.2) sont très particulier et semblent fortement variables d'un cas à l'autre (migrations locales ou lointaines, migrations des foyers paysans « mobiles » ou « dépendants »), alors que toutes ces particularités sont autant de variations complexes autour d'une logique commune et simple, dans laquelle la probabilité de migrer est directement proportionnelle à l'insatisfaction (ie. $1 - satisfaction$).

Au cours du temps, le modèle a donc été complexifié par ses auteurs. Cette complexification, ou spécification, visait d'une part à détailler des comportements pour les rendre plus représentatifs des connaissances thématiques, et d'autre part à en ajuster le fonctionnement en fonction des résultats sur lesquels ils aboutissaient. Ce double objectif a défini le processus de « paramétrage » qui a été réalisé, et visait ainsi à « améliorer » le modèle.

Cette « amélioration » ne peut s'entendre qu'au regard des objectifs du modèle, c'est-à-dire du questionnement initial auquel il doit permettre de répondre. Pour cela, il est nécessaire de définir des critères permettant de qualifier la capacité du modèle à répondre à ces questions ainsi que la qualité de ces réponses. En somme, après avoir présenté le fonctionnement du modèle, il est indispensable de revenir sur les raisons de ce fonctionnement, et donc de présenter les modalités de ce qui a guidé le paramétrage de SimFeodal, à savoir son évaluation.

Évaluer et paramétrier un modèle de simulation complexe en situation d'inter-disciplinarité

Version 2019-11-11

- 31/10/2019 : Fusion anciens chapitre 3 (évaluation) et 4 (paramétrage)
- 07/11/2019 : Fin reprise (3.1 et 3.2) + création (3.3)
- 08/11/2019 : Impression Lena
- 11/11/2019 : reprises commentaires Lena du 24/11/2017 + finalisation

Sommaire

<i>Avant-propos</i>	40
Introduction	42
2.1 Objectifs du modèle SimFeodal – <i>Purpose</i>	43
2.1.1 Contexte historiographique	43
2.1.2 Questionnement	45
2.2 Entités et échelles – <i>Entities, state variables, and scales</i>	46
2.2.1 Entités	46
2.2.2 Échelles spatiales et temporelles	50
2.3 Fonctionnement général – <i>Process overview and scheduling</i>	53
2.3.1 Initialisation	54
2.3.2 Variables globales	55
2.3.3 Renouvellement des foyers paysans	55
2.3.4 Mise à jour du maillage paroissial	56
2.3.5 Détection des Pôles	58
2.3.6 Satisfaction des Foyers Paysans	58
2.3.7 Migration des Foyers Paysans	60
2.3.8 Gains de droits	61
2.3.9 Collecte des droits	61
2.3.10 Dons entre seigneurs	62
2.3.11 Construction et promotion des châteaux	63
2.3.12 Création de nouveaux seigneurs	65
2.3.13 Détection des agrégats	65
2.3.14 Actualisation des pôles	66

2.3.15 Enregistrement des <i>outputs</i>	67
2.4 Concepts de modélisation– <i>Design concepts</i>	67
2.4.1 Principes de base - <i>Basic principles</i>	67
2.4.2 Théories et concepts de la modélisation agents mobilisés	70
2.5 Situation initiale – <i>Details - Initialisation</i>	74
2.5.1 Une situation initiale théorique et générée de manière endogène	74
2.5.2 Paramètres d'initialisation	76
2.6 Données en entrée – <i>Input data</i>	78
2.7 Mécanismes spécifiques – <i>Submodels</i>	78
2.7.1 Introduction	78
2.7.2 Mécanismes globaux	81
2.7.3 Foyers paysans	85
2.7.4 Seigneurs	89
Conclusion	93

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté un modèle, SimFeodal, dont l'objectif est de réussir à répondre à un questionnement thématique ([ref 2.1.2](#)) portant sur la capacité des agents et mécanismes modélisés à reproduire les phénomènes de polarisation, de hiérarchisation et de fixation de l'habitat paysan entre les IX^e et XIII^e siècles. Pour juger de la capacité du modèle à reproduire ces processus empiriques, il faut être en mesure d'évaluer le modèle, c'est-à-dire de lui fixer des critères de succès et de mettre en place une méthodologie permettant de juger si oui ou non ces critères sont atteints.

Ces critères sont au cœur d'un domaine incontournable et fortement étudié de la modélisation, quelle qu'en soit le type : l'évaluation de modèle. Dans le cas de SimFeodal, modèle descriptif et complexe, l'évaluation ne peut se faire de manière formelle, c'est-à-dire analytique, tant les interactions entre agents et mécanismes sont nombreuses, non linéaires, et donc non prédictibles. L'évaluation ne peut donc être qu'expérimentale, en analysant le comportement du modèle sur la base de ses sorties.

SimFeodal pose de plus le problème d'être un modèle basé sur des connaissances expertes plutôt que sur des données directement intégrables ou confrontables. Cela en complexifie l'évaluation, car les approches classiques sont peu adaptées à ce type de modélisation interdisciplinaire basé sur des hypothèses. Il est en effet difficile de quantifier, voire parfois de spécifier de manière explicite, les attentes vis-à-vis du modèle.

Les difficultés liées à l'évaluation du modèle sont renforcées par le type de construction mis en place pour SimFeodal : en plus d'être descriptif, SimFeodal est un modèle exploratoire, dans lequel l'évaluation n'a pas vocation à valider une version définitive et statique du modèle, mais au contraire à guider son amélioration par des ajustements successifs.

Dans le chapitre précédent, on décrivait par exemple une « version » du modèle, intitulée « version 6.3 », ce qui montre qu'auparavant, il y a nécessairement eu au moins 5 versions préalables, et sans doute bien plus de sous-version. Ce chapitre vise ainsi, aussi, à présenter le processus d'amélioration du modèle, que nous nommons « paramétrage », c'est-à-dire l'approche théorique et empirique qui a guidé l'évolution de SimFeodal.

Dans ce chapitre, nous présenterons donc en premier lieu le démarche globale d'évaluation, et en particulier une proposition de méthode d'évaluation – l'évaluation visuelle – adaptée aux modèles du type de SimFeodal. Nous pourrons alors spécifier cette approche en l'appliquant au cas de SimFeodal, c'est-à-dire en présentant les critères retenus pour l'évaluation du modèle. Dans une troisième partie, il sera alors possible de décrire le paramétrage du modèle, son articulation avec l'évaluation précédemment décrite, et de mener une analyse rétrospective de l'évolution de SimFeodal.

3.1 Comment évaluer un modèle ?

Depuis les travaux précurseurs en simulation informatique (NAYLOR et FINGER 1967 ; HERMANN 1967 ; SARGENT 1979) jusqu’aux recherches contemporaines (AMBLARD, ROUCHIER et BOMMEL 2006 ; BANOS 2013 ; AUGUSIAK, BRINK et GRIMM 2014 ; REY-COYREHOURCQ 2015), la plupart des chercheurs ont toujours mis en avant qu’un modèle de simulation non évalué n’avait ni utilité – pour NAYLOR et FINGER 1967 notamment –, ni validité. Sans caricaturer ces écrits, on peut noter que tous cantonnent les modèles non évalués à des « jeux » ou encore, pour les plus modérés, à des outils uniquement pédagogiques.

Comme indiqué dans le chapitre 1, nous considérons SimFeodal comme un modèle résolument pédagogique, et l’on pourrait dès lors se passer d’en mener une évaluation quelconque. Il nous semble pour autant que l’exercice intellectuel que constitue la (co-)construction d’un modèle de simulation perdrait de son intérêt intrinsèque s’il ne donnait lieu à des procédures, quelles qu’elles soient, ayant pour objectif d’assurer une certaine qualité au modèle, à défaut de lui garantir une validation stricte.

Nous sommes en effet convaincus que même pour des modèles visant à « assister la construction de théories »¹ pour reprendre les termes de LAKE (2014, p. 260), ou encore, selon la classification alternative de l’auteur, pour les modèles à utilité « de développement »², les différents outils d’évaluation permettent d’acquérir une connaissance précieuse sur l’objet modélisé, ne serait-ce que par les effets collatéraux qu’entraîne l’évaluation d’un modèle. Qu’un modèle soit statistique ou à base d’agents, de type descriptif ou explicatif, à visée pédagogique ou prédictive, ou encore constitue un modèle « hybride » entre ces catégories, un modèle de simulation demeure un modèle qu’il convient d’évaluer pour être en mesure d’en tirer des connaissances (SARGENT et BALCI 2017, p. 299-300).

Sans entrer dans les spécificités conceptuelles de ce qu’est l’évaluation d’un modèle ou de l’histoire de ces méthodes³, nous nous contenterons dans la suite de cette partie de donner une vision aussi succincte que possible de ce qu’est l’évaluation, en particulier pour en dégager les méthodes employées usuellement. Cela nous permettra en particulier de défendre et de promouvoir l’une de ces méthodes, la validation visuelle, que nous jugeons très adaptée dans le cadre de co-constructions interdisciplinaires de modèles.

1. « Simulation models to support theory building – so-called heuristic modelling – [...]. »

2. « ’developmental’ utility », c'est-à-dire les modèles dont le développement et l’implémentation bénéficient aux chercheurs qui y prennent part plutôt qu'à ceux qui se contentent de les utiliser a posteriori.

3. En particulier parce que ce sujet a été très largement traité dans un travail de thèse récent au sein de notre laboratoire de recherche (REY-COYREHOURCQ 2015, pp. 58–184), travail auquel nous renvoyons vivement pour plus d’approfondissements.

3.1.1 Évaluation, validation, vérification...

Il nous semble important de commencer cette partie par un point de définition et de clarification des concepts mobilisés, non pas par convention datée, mais parce que les usages en matière d'emploi des termes d'évaluation, de validation (méthodologique, formelle...) ou encore de vérification sont particulièrement diffus et trompeurs dans la littérature relative à la modélisation, y compris dans le champ plus restreint de la simulation à base d'agents en sciences humaines et sociales.

Depuis les travaux fondateurs, dans les années 1960, la logique qui consiste à éprouver un modèle – c'est-à-dire à (1) vérifier qu'il corresponde correctement d'une part au système qu'il décrit, et d'autre part à (2) la manière dont il est décrit – donne lieu à différentes terminologies. On notera en particulier que les deux articles considérés comme pionniers, tous deux parus en 1967, reposent pour l'un sur la notion de vérification (NAYLOR et FINGER 1967), et pour l'autre sur celle de validation (HERMANN 1967), sans pour autant que la distinction entre les deux approches puisse être vue comme consistante. Quelques décennies plus tard, une fois la pratique de simulation informatique plus développée et mûre, un consensus de pratique a été adopté autour de l'expression englobante de « Validation, Verification and Testing techniques (VV&T) », par l'entremise d'une proposition de BALCI (1994) de clarification et de définition de chacun de ces composants. Pour reprendre ses mots en une distinction devenue courante en simulation à base d'agent, la *validation* consiste à concevoir le bon modèle⁴ – sens (1) exposé plus haut –, alors que la *verification* permet de s'assurer que le modèle est bien construit⁵ – sens (2). Le « *Testing* » correspond aux techniques mises en œuvre, et s'applique donc indistinctement à ces deux termes (*validation* et *verification*).

En dépit de cette définition stricte, les usages persistent dans une absence de distinction formelle entre vérification et validation, le plus souvent en englobant ces pratiques dans le terme plus large et moins défini d'« évaluation ». Il n'est d'ailleurs pas rare que ces trois termes soient employés de manière interchangeable, voir intervertie, comme un recensement rigoureux des usages le démontre (AUGUSIAK, BRINK et GRIMM 2014). Dans cet article, les auteurs mènent une métá-analyse de la littérature sur les usages de chacun des termes liés à l'évaluation⁶, et en particulier de celui de *validation*, et du sens signifié par leurs auteurs respectifs. Ils en tirent le constat qu'une large partie des termes analysés a été employé par plusieurs auteurs leur affectant des sens contradictoires. Par exemple : « the term “validation” has been given virtually any possible meaning in this context » (AUGUSIAK, BRINK et GRIMM 2014, p. 120).

Les auteurs de cette étude puisent dans ce constat les besoins d'une nouvelle terminologie, unique et explicite, permettant de dépasser notamment les suc-

4. « Model validation deals with building the *right* model. » (BALCI 1994, p. 121)

5. « Model verification deals with building the model *right*. » (BALCI 1994, p. 123)

6. *Corroboration, Evaluation, Testing, Validation, Verification et Substantiation*

cessions d'attrait et de rejet que la notion de validation entraîne de par son positivisme. Ils proposent ainsi un nouveau terme, l'*« evaludation »*, assorti à une typologie de concepts – explicitement définis (AUGUSIAK, BRINK et GRIMM 2014, table 2, p. 125) – liés à l'évaluation permettant d'identifier l'objet et le sujet de chacune des phases du cycle d'*« évaludation »* (voir figure 3.1).

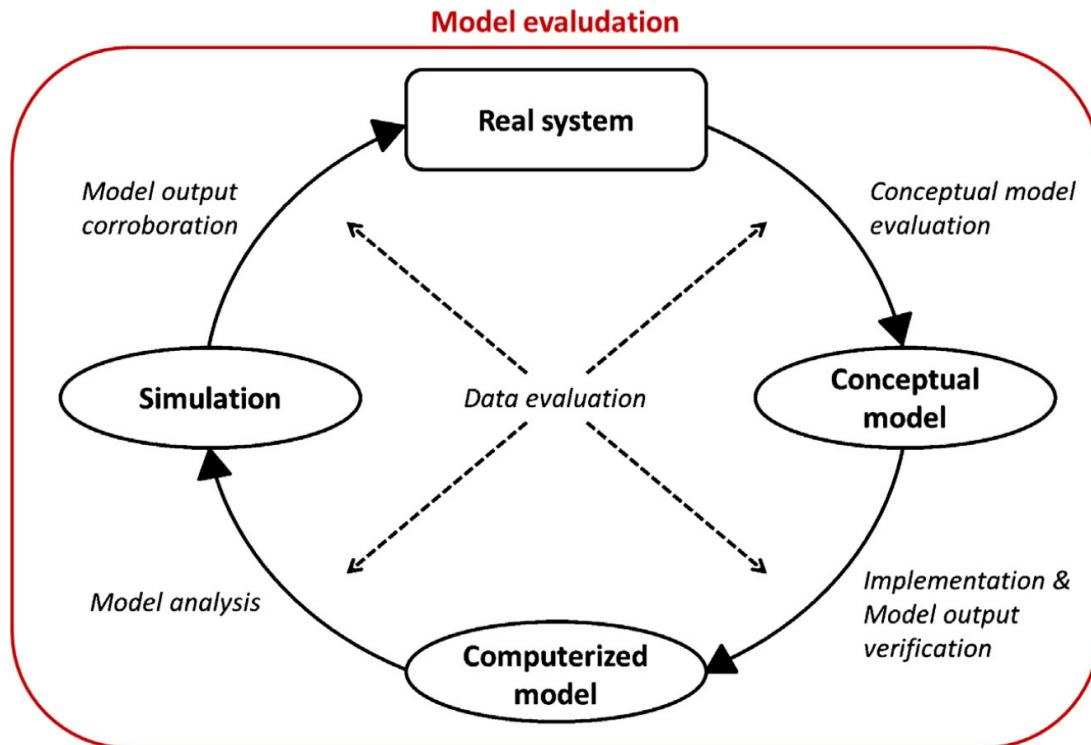


FIGURE 3.1 – Représentation schématique du cycle de modélisation et de la typologie des termes relatifs à l'évaluation de modèle, dans AUGUSIAK, BRINK et GRIMM (2014, Fig. 1, p. 121)

Nous partageons absolument le besoin formel, identifié par les auteurs de cette étude, de définir un nouveau terme dans leur proposition, et nous souscrivons à leur approche de définition. Il nous semble toutefois, et nous le déplorons, que ce travail n'ait pas encore suffisamment percolé dans la communauté scientifique, et en particulier dans le monde francophone. Au moment de rédiger ces lignes, seuls deux auteurs en font un usage en français, au moins l'un des deux (REY-COYREHOURCQ 2015, p. 89, 436) ne le mentionnant que par recension.

Par soucis d'homogénéité et de compréhension par un plus grand nombre de ce travail, nous nous contenterons donc de nous inscrire dans les choix de AMBLARD, ROUCHIER et BOMMEL (2006, voir encadré 3.1), en particulier parce qu'ils nous semblent assez largement adoptés dans la communauté scientifique francophone de modélisation en sciences humaines et sociales, quand bien même ces concepts nous paraissent moins robustes que ceux présentés auparavant.

Encadré 3.1 : Évaluation, validation interne et externe

Pour AMBLARD, ROUCHIER et BOMMEL (2006), on emploie le concept d'**évaluation** pour définir l'approche d'ensemble, et on distingue alors « **validation interne** » – correspondant à la *verification* définie par BALCI (1994), c'est-à-dire s'assurer de la bonne conception du modèle, et « **validation externe** » – ce que BALCI nomme *validation*, soit l'assurance que le modèle est adapté à ce qu'il cherche à représenter.

« Il est classique de différencier deux étapes dans la validation : interne et externe.

- La phase de vérification ou **validation interne** comprend d'abord une vérification de conformité entre les spécifications et le programme implémenté et pose la question : est-ce que le modèle implémenté est bien celui que je voulais implémenter ? [...] Ensuite, la validation interne concerne la recherche et l'identification des propriétés du modèle. Dans le cas des simulations multi-agents, des preuves logiques ne peuvent être obtenues et se pose alors la question : est-ce que mon modèle possède les propriétés attendues ? Parmi ces bonnes propriétés, on considère par exemple la robustesse ou des études de sensibilité pour vérifier si les réponses sont bien différenciées sur l'espace des paramètres. Cette phase de validation interne concerne de fait une validation dans le contexte ou la logique propre du modèle.
- La deuxième phase de validation, la **validation externe**, correspond à l'évaluation de l'adéquation entre le modèle et le phénomène réel dont il est censé rendre compte. Pour cette dernière phase, la comparaison aux données empiriques ou le fait que le modèle soit capable d'exhiber des faits stylisés identifiés sur le système modélisé sont des critères clés.

Ainsi, ce qui est étudié au travers des simulations, ce sont tout d'abord les propriétés systémiques (structurelles et dynamiques) du modèle, les formes qui peuvent apparaître du fait des hypothèses posées (validation interne); ensuite est évaluée la pertinence du modèle vis-à-vis de situations que l'on souhaite représenter ou prévoir (validation externe). »

AMBLARD, ROUCHIER et BOMMEL 2006, p. 110-111

3.1.2 Les étapes de l'évaluation d'un modèle

Parmi les nombreuses techniques disponibles pour l'évaluation, il est courant de privilégier telle ou telle méthode en fonction de la phase d'avancement d'un modèle. Traditionnellement, l'usage veut ainsi que le modélisateur tende vers des méthodes de plus en plus formelles à mesure que l'évaluation progresse⁷. Les schémas des étapes d'évaluation de KLÜGL (figure 3.2) et de NGO et SEE (figure 3.3) constituent un bon résumé de cette progression – représentée de manière itérative quand bien même chaque auteur insiste sur le fait que ces étapes doivent être menées en multipliant les allers-retours entre elles – que l'on peut brièvement décrire plus avant.

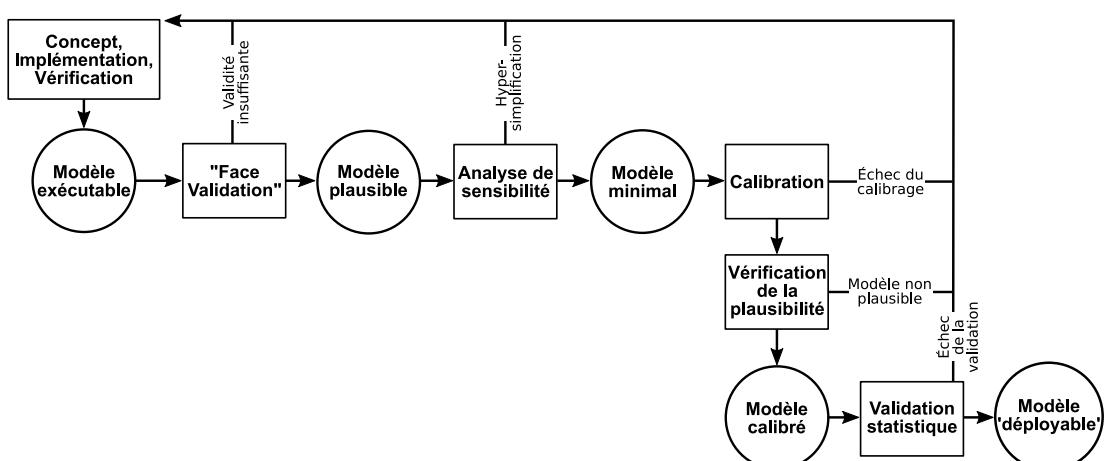


FIGURE 3.2 – « Sketch of a general procedure for validating an agent-based simulation », traduit d'après KLÜGL (2008, fig. 1 p. 42)

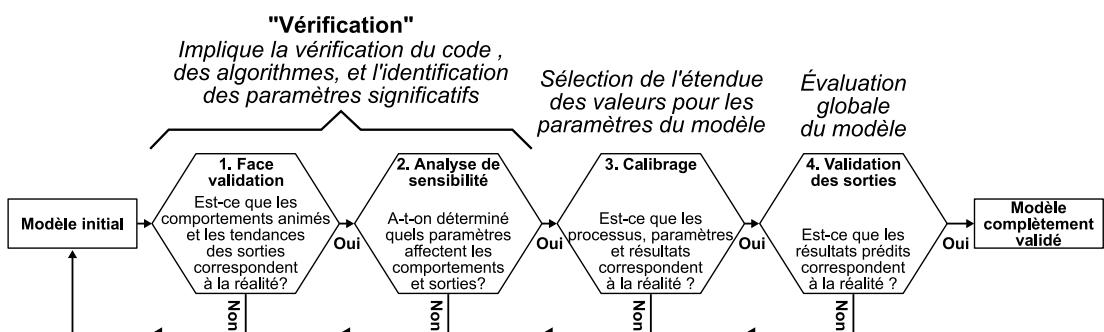


FIGURE 3.3 – « General validation process of an ABM », traduit d'après NGO et SEE (2012, fig. 10.1 p. 183)

« Face validation ». La première étape, de « *face validation* », consiste ainsi à vérifier visuellement, en se conformant à des intuitions sur le comportement attendu, la plausibilité du modèle. On entend par plausibilité la potentielle adéquation entre le déroulement (en termes de dynamiques observés) et l'issu (au travers des données produites) d'une simulation, et les connaissances expertes que l'on possède sur le système modélisé. Cette étape est souvent considérée comme une mesure préalable relevant du bon sens plus que de l'évaluation strictement dite, et relève autant de la validation interne que de la validation externe. Nous reviendrons plus longuement sur cette étape, essentielle d'après

7. Voir par exemple la typologie des méthodes d'évaluation, des plus « informelles » aux méthodes « formelles » chez BALCI (1994, figure 3, p. 131)

l'avis partagé dans la littérature mais néanmoins largement sous-exploité et méjugée à notre avis, dans les pages suivantes (voir section 3.1.3).

Analyse de sensibilité. Quand une première version du modèle a été implémentée, il est recommandé de procéder à l'analyse de sa « sensibilité », entendue à l'égard des paramètres du modèle : en faisant varier, selon des méthodes plus ou moins complexes⁸, les valeurs des différents paramètres du modèle, on peut observer l'influence de chaque paramètre sur le déroulement du modèle. Cette mesure, relative à la validation interne, intervient tôt, et doit être répétée lors de chaque modification majeure dans les mécanismes du modèle. L'analyse de sensibilité permet en effet de simplifier le modèle conceptuel et son pendant implanté : si l'analyse révèle qu'un paramètre, quelles que soient les valeurs qui lui sont attribuées, n'a qu'un effet minime voire négligeable sur les sorties du modèles, alors il peut être judicieux de supprimer ce paramètre ou le mécanisme qui le mobilise. Réduire le nombre de paramètres ou de mécanismes d'un modèle peut sensiblement l'améliorer, selon le principe de parcimonie qui voudrait qu'un modèle plus simple soit meilleur⁹. Même sans aller jusqu'à ce type de découvertes sur l'inutilité de certains paramètres, l'analyse de sensibilité permet de gagner en connaissance sur le fonctionnement d'un modèle complexe et/ou non-déterministe, ne serait-ce que parce qu'elle aide souvent le modélisateur à trouver une « polarité » à l'effet des paramètres : si tel indicateur de sortie (voir section 3.2.1) croît quand on diminue les valeurs d'un paramètre et décroît quand on les augmente, alors on peut prévoir l'effet d'une modification de ce paramètre, ce qui peut éclairer le fonctionnement thématique du modèle.

Calibrage. Une fois le modèle mieux connu et surtout réduit à ses composantes nécessaires et suffisantes, on cherche à en améliorer la qualité de représentation, c'est-à-dire à faire en sorte, en jouant sur les valeurs de paramètres, que le modèle reproduise plus précisément le système qu'il décrit (validation externe) et qui correspond à l'observation empirique ou aux connaissances thématiques. Cette démarche, nommée calibrage, soulève l'enjeu d'isoler, pour chaque paramètre, une étendue de valeurs acceptables et optimales. La complexité – au sens figuré – de cette étape réside dans la complexité – au sens propre – du modèle qu'il convient de calibrer : dans un modèle complexe, où chaque mécanisme peut influencer chacun des autres mécanismes de manière non linéaire, la modification des valeurs d'un paramètre doit certes modifier l'état du modèle en lui-même, mais a le plus souvent tendance à modifier par là même l'optimalité des valeurs des autres paramètres. Le problème ressemble à celui des vases communicants : pour que le modèle soit calibré, il faut que chaque valeur de paramètre soit optimale, mais la modification de chacun des paramètres peut dérégler l'effet des autres paramètres, et par la même les valeurs qu'ils doivent se voir attribuer. On ne peut donc procéder paramètre par paramètre, en les réglant un par un, au risque d'entrer dans une boucle infinie

8. Un point plus précis y est consacré dans le [chapitre 6](#)

9. Les avis divergent nettement sur ce point, voir par exemple la définition de la *simplicité* dans AMBLARD, ROUCHIER et BOMMEL (2006, p. 120)

de calibrage, mais au contraire, il est nécessaire de considérer l'ensemble – ou un sous-ensemble – des paramètres et de tester des valeurs qui iraient vers une optimisation du comportement du modèle. Le calibrage en lui-même n'est pas à proprement parler une véritable procédure d'évaluation d'un modèle : il vise ainsi plutôt à « améliorer » le modèle plus qu'à juger de sa validité. Il s'agit ainsi plutôt d'une méthode et d'un problème d'optimisation que d'évaluation. Les différents auteurs mettent toutefois en avant son intérêt dans l'évaluation de modèle en ce qu'il permet de garantir une meilleure validation externe du modèle puisqu'il aboutit à l'isolation d'étendues optimales de valeurs de paramètres : en menant de nouveaux tests d'évaluation (analyse de sensibilité, *face validation*, etc.) (KLÜGL 2008, p. 43) sur les valeurs optimales identifiées, on peut évaluer si elles sont porteuses de sens d'un point de vue empirique ou au moins vis-à-vis de la connaissance experte du système modélisé.

Validation statistique. La validation statistique (« *output validation* » dans la figure 3.3) est sans doute la méthode d'évaluation la plus évidente pour qui-conque a été amené à concevoir un modèle. Il s'agit de confronter les données produites par le modèle – les *outputs* – aux données empiriques – ou observées – qu'ils cherchent à reproduire. Autrement dit, en termes statistiques, à s'assurer de la qualité de l'ajustement – la *goodness of fit* – des données simulées. On en mesure l'écart avec les données observées, quand de telles données sont disponibles, en cherchant à minimiser cet écart : plus l'écart est faible, alors plus le modèle parvient à reproduire les observations qui ont servi de support à sa conception et construction. La validation statistique est donc une méthode de validation externe. Les différents auteurs du champ de l'évaluation recommandent de ne mener cette étape qu'à la fin du processus d'évaluation, quand le réflexe en pratique est souvent de s'appuyer sur les données théoriques dès le début de la conception du modèle. A défaut de suivre cette recommandation, le modélisateur risque d'emmener le modèle vers du « sur-ajustement » (*overfitting*), et d'inscrire alors celui-ci dans une forme de tautologie, le modèle étant alors construit précisément pour produire ce qu'il devrait plutôt faire émerger. En conservant la validation statistique comme l'une des dernières étapes du cycle d'évaluation, c'est-à-dire en s'empêchant d'essayer de faire coller le modèle aux données qu'il doit reproduire, on s'assure de l'indépendance des mesures de l'ajustement, et on peut donc garantir une certaine objectivité quant à l'évaluation du modèle.

Validations formelles. Absentes des deux figures (3.2 et 3.3), les méthodes de validation formelles sont toutefois porteuses d'un intérêt assez prégnant quand elles sont applicables. Ces méthodes visent à résoudre de manière analytique un modèle complexe, c'est-à-dire à mettre en équations les comportements du modèle, leurs effets d'interaction, et à résoudre ces équations pour en proposer les ensembles finis de solutions ou d'états. Cela requiert d'être en mesure de convertir un modèle exprimé dans un formalisme quelconque en un système d'équations dynamiques, et de parvenir en outre à résoudre l'ensemble de ce système. Dans l'évaluation de modèles au sens large, cette étape peut se révéler indispensable et assez directe, par exemple quand il apparaît nécessaire d'évaluer un modèle basé sur la théorie des jeux, que l'on traite alors

sous forme d'analyse de graphes.

Dans le cas plus spécifique des modèles à base d'agent, cas dans lequel nous nous inscrivons ici, la situation est plus difficile. On emploie généralement la modélisation à base d'agents parce qu'elle encourage une approche anthropomorphique, plus aisément compréhensible et requérant moins de connaissances mathématiques que d'autres approches, mais aussi car il est terriblement complexe d'exprimer des systèmes dotés de multiples interactions, qui plus est multi-scalaires, sous forme de réseaux d'équations. En un sens, on pourrait presque considérer qu'on fait appel à de la modélisation à base d'agents quand on ne peut mobiliser des modèles formels. Le processus qui tendrait à formaliser, mathématiquement, des modèles agents est alors intrinsèquement contre-intuitif et difficile, quand bien même certains pensent que ce n'est pas une fatalité mais une question de temps¹⁰. Si la nature même de cet exercice implique vraisemblablement que peu s'y essayent, on notera tout de même que quelques auteurs (ZHANG 2011; GRAUWIN, GOFFETTE-NAGOT et JENSEN 2012)¹¹ sont parvenus à résoudre de manière analytique un modèle fondamentalement pensé comme un modèle agent – en automate cellulaire en l'occurrence –, le modèle de Schelling (voir encadré 3.6). En dehors de l'intérêt que cela peut représenter pour la connaissance de ce modèle en particulier, rappelons tout de même que le modèle de Schelling a été énoncé à la fin des années 1960, que c'est un modèle particulièrement parcimonieux, et qu'il a tout de même fallu attendre le tournant des années 2010 afin d'y trouver une solution formelle. Notons enfin que pour certains auteurs, dont l'un des pères de la modélisation à base d'agents informatiques EPSTEIN (2006), la résolution analytique de modèles de simulation à base d'agents n'est pas véritablement un enjeu, l'objectif étant d'utiliser le paradigme le plus « éclairant » pour un problème donné :

« The oft-claimed distinction between computational agent models, and equation-based models is illusory. Every agent model is, after all, a computer program (typically coded in a structured or object-oriented programming language). As such, each is clearly Turing computable (computable by a Turing machine). But, for every Turing machine, there is a unique corresponding and equivalent par-

10. Par exemple Alain FRANC, mathématicien dans le projet TransMonDyn : « L'une des difficultés de l'acceptation des SMA comme modèles est que ces comportements sont très mal compris mathématiquement. Il existe peu de résultats qui permettent de relier un type de règles avec un type de comportement, alors que de tels liens sont à la base du succès des systèmes dynamiques, où l'on connaît (parfois...) les gammes de paramètres qui mènent à un comportement d'équilibre, cyclique ou chaotique, et l'on sait qu'il ne peut y en avoir d'autres. [...] Il existe donc une tension entre, d'un côté, les systèmes dynamiques qui forment une théorie riche et solide de modélisation mathématique, mais pour un nombre assez restreint de situations (bien des difficultés apparaissent dans le cadre non linéaire, que l'on peut lire dans la richesse des travaux sur la modélisation de la turbulence par exemple) et, d'un autre côté, les SMA qui permettent des simulations à partir de règles plus riches et diversifiées, mais pour des résultats dont la compréhension mathématique très souvent nous échappe (il y a peu de théorèmes). On peut donc dire en résumé que les SMA sont « en avance » sur la compréhension mathématique des systèmes dynamiques et peuvent proposer des cas d'études aux mathématiciens. » (OURIACHI et al. 2018, Annexe 2, « Retour sur les SMA comme outil et cadre conceptuel de modélisation. », pp. 479-482)

11. Lena : regarder Axelrod et Axtell, dans leur article sur les 4 modes d'utilisation d'un SMA, article très maths. -> Je ne trouve pas cette référence.

tial recursive function [see Hodel (1995)].

[...]

So, in principle, one could cast any agent-based computational model as an explicit set of mathematical formulas (recursive functions). In practice, these formulas might be extremely complex and difficult to interpret. But, speaking technically, they surely exist. [...]

In any case, the issue is not whether equivalent equations exist, but which representation (equations or programs) is most illuminating. »

EPSTEIN (2006, p. 1590-1591)

Dans l'absolu, en ce qui concerne les modèles à base d'agents, il est donc difficile d'aller vers une validation formelle totale, mais on peut tout de même gagner en connaissances en mobilisant des méthodes qui cherchent à « résoudre » des modèles de simulation, de manière non formelle, par exemple autour des nombreux travaux actuels (par exemple CHÉREL, COTTINEAU et REUILLOUN 2015) qui visent à l'exploration complète des comportements possible d'un modèle¹².

Quelle évaluation pour quels modèles ? Les étapes d'évaluation énumérées ci-dessus consistent autant en une approche chronologique – relative aux phases successives de la construction d'un modèle – qu'en un gradient de qualité de l'évaluation, souvent considéré en fonction de la difficulté et du coût temporel nécessaire à chacune de ces méthodes¹³. Il est évident à la lecture des auteurs de références du champ (par exemple ceux référencés en section 3.1) que pour eux, « plus » le modèle est évalué, c'est-à-dire se confronte aux étapes d'évaluation de plus en plus formelles, plus il sera digne de confiance et donc capable d'apporter des connaissances sur les objets qu'il tend à représenter. Robert SARGENT par exemple différencie les méthodes d'évaluation selon que le système modélisé est observable ou non, c'est-à-dire « s'il est possible ou non de collecter des données sur le comportement opérationnel de l'entité »¹⁴. Pour autant, ces auteurs soulignent aussi que selon les choix de modélisation et les caractéristiques du système modélisé, toutes ces étapes ne sont pas nécessairement accessibles ou possibles.

Nous pensons qu'un autre facteur peut affecter plus fortement l'éventail des méthodes possibles d'évaluation : la parcimonie du modèle réalisé. Ainsi, avec un modèle très parcimonieux, qui s'inscrirait dans un certain purisme des méthodes « KISS », doté d'un nombre minime d'*outputs*, il nous semble que toutes les méthodes, y compris les plus formelles, sont assez simplement – si ce n'est pour la résolution analytique, on l'a vu plus haut – applicables. A contrario, un modèle très descriptif, ancré dans une approche « KIDS », fourmillant

12. C'est par exemple l'un des enjeux principaux, en matière de recherche, d'une plate-forme telle qu'OpenMOLE (REUILLOUN, LECLAIRE et REY-COYREHOURCQ 2013)

13. « [One] should start with cheap tests that allow fast rejection of the model and continue investing more and more effort when the model becomes more and more valid. », KLÜGL (2008, p. 42), par exemple.

14. « The major attribute affecting operational validity is whether the problem entity (or system) is observable, where observable means it is possible to collect data on the operational behavior of the program entity. », SARGENT (2009, p. 6).

d'*inputs*, de paramètres et d'*outputs* sera bien plus complexe à évaluer de manière quantitative, ou « objective » selon les mots des pionniers de l'évaluation.

Pour illustrer l'écart entre ces approches en matière de possibilités de quantification de l'évaluation, prenons l'exemple d'une analyse de sensibilité : cette technique consiste à faire co-varier les valeurs des paramètres afin d'observer les effets que, chacun ou conjointement, ils produisent sur les sorties du modèle. Avec un modèle de Schelling, dans lequel on identifie en général trois paramètres (cf. encadré 3.6), que l'on peut faire varier chacun selon une granularité de dix valeurs, et tenir compte de l'aléa en menant dix réplications, on peut mener une analyse de sensibilité basique au moyen de $(10^3 \times 10) = 10\,000$ simulations. Dans le cas d'un modèle doté d'une dizaine de paramètres, et avec le même type d'analyse basique, le nombre de simulations nécessaire dépasserait déjà le milliard...

Pour de tels modèles, malgré tout assez peu complexe au regard de certains des tenants du genre KIDS, une analyse de sensibilité rigoureuse ou un calibrage fin ne sont en aucun cas envisageables selon les canons méthodologiques de l'évaluation. Dans ce cas, les théoriciens de l'évaluation recommandent, à défaut de mieux, de tout de même mener les premières étapes d'un cycle d'évaluation (PETTY 2010, p. 342) : « While moving beyond face validation to more objective and quantitative methods should always be a goal, face validation is clearly preferable to no validation at all. »

Nous ne partageons pas la réticence associée à cette recommandation, et au contraire, considérons que dans ce type de cas, des méthodes de « *face validation* » peuvent être, à condition d'être rigoureuses, extrêmement satisfaisantes et sans doute suffisante pour évaluer un modèle de simulation, ce que nous allons essayer de montrer par la suite.

3.1.3 Une évaluation de la plausibilité d'un modèle : la « *face validation* »

Avant d'aller plus avant dans la justification de l'utilité des méthodes de *face validation*, il convient de définir plus précisément ce à quoi la littérature réfère quand elle préconise cette méthode d'analyse de plausibilité d'un modèle.

3.1.3.1 Définition

Le terme semble avoir émergé dans les années 1940, en particulier dans le champ scientifique de la psychologie et des études pédagogiques (NEVO 1985). Concept discuté et disputé dans ces domaines (MOSIER 1947), on y attribue un besoin pour les modèles, statistiques dans ce cas, de présenter à la fois une validité à l'épreuve des données, mais aussi de présenter une apparence de validité, c'est-à-dire de sembler plausibles¹⁵.

15. « In this usage, the term “face validity” implies that a test which is to be used in a practical situation should, in addition to having pragmatic or statistical validity, appear practical,

Pour illustrer ce besoin de « plausibilité », on peut prendre l'exemple des problèmes de corrélations fallacieuses (ou « *spurious correlations* ») et autres exemples de la non-équivalence de causalité et corrélation. À la suite d'un article (SHAW 2017) liant utilisation de glyphosate et nombre d'enfants diagnostiqués autistes (figure 3.4), plusieurs chercheurs ont renvoyé à l'analyse menée par un membre de l'espace de discussion *reddit*¹⁶. Celui-ci qui proposait en effet – de manière ironique – une explication opposée, liant prévalence de l'autisme et vente de produits de l'agriculture biologique (figure 3.5).

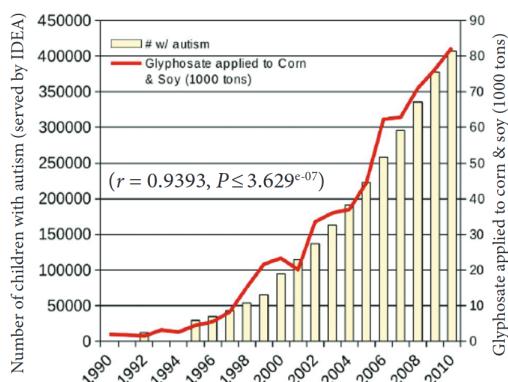


FIGURE 3.4 – Relation entre autisme et utilisation de glyphosate, d'après SHAW 2017, Figure 2, p. 51

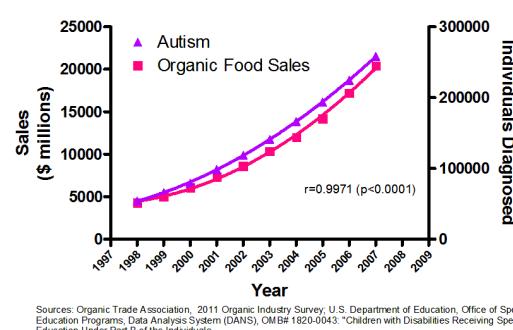


FIGURE 3.5 – Relation entre autisme et vente d'aliments « bio », d'après « jasonp55 », 2012.

En termes de validation statistique, le second modèle est meilleur, donc plus valide : son coefficient de corrélation est de 0.997 quand celui du premier ne vaut que 0.939. En dehors du principe statistique qui veut que causalité et corrélation ne soient pas équivalents, cet exemple illustre la nécessité d'apporter un éclairage en termes de plausibilité dans l'évaluation : tout épidémiologue pourra rejeter les conclusions du second graphique en se basant sur son intuition face à l'absence de relation empirique entre autisme et alimentation biologique. Cet exemple, trivial, illustre le besoin d'une évaluation basée sur la plausibilité, quand bien même une validation statistique aurait déjà été effectuée et jugée concluante.

L'utilisation très polysémique – et donc contradictoire – de « *face validity* », et les importants débats autour de l'usage de ce terme ayant poussé à sa désuétude¹⁷, on le retrouve pourtant au cœur de l'un des articles fondateurs de l'évaluation de modèles de simulation, où HERMANN le définit ainsi :

« Face validity is a surface or initial impression of a simulation or game's realism. Probably no approach to model validity is reported

pertinent and related to the purpose of the test as well; i.e., it should not only be valid but it should also appear valid. This usage of the term assumes that “face validity” is not validity in any usual sense of the word but merely an additional attribute of the test which is highly desirable in certain situations. » MOSIER (1947, p. 192)

16. Message posté par l'utilisateur « jasonp55 » en 2012 : www.reddit.com/r/skeptic/comments/14qbn9/

17. MOSIER 1947, p. 205 recommande même son abandon : « Since the term ”face validity” has become overlaid with a high degree of emotional content and since its referents are not only highly ambiguous but lead to widely divergent conclusions, it is recommended that the term be abandoned. »

more frequently than the subjective estimates of experimenters, observers, or human participants as to the correspondence between the model's operation and their perception of the actual phenomena which the game or simulation represent. [...]

Face validity can be a significant part of a validity strategy. A quick impression that "things don't seem right" may be the only validity check possible during the actual operation of a game or simulation. Such validity judgments and their evaluation may also be part of the learning experience provided by operating models designed for instructional purposes. »

HERMANN (1967, p. 221)

Quelques années plus tard, on en trouve une définition plus succincte chez un des fondateurs de l'évaluation de modèles : « Face validity is asking people knowledgeable about the system whether the model is reasonable. » (SARGENT 1979, p. 500). Cette définition introduit un aspect qui nous semble important en matière de *face validation* : il ne s'agit pas de faire évaluer la plausibilité d'un modèle par un quelconque examinateur, mais bel et bien par un expert du sujet modélisé. Ce type d'évaluation n'a donc pas uniquement vocation à démasquer des comportements contre-intuitifs, mais bel et bien à faire expertiser, par un thématicien, le déroulement et l'aboutissement d'un modèle de simulation.

Il a fallu attendre la relative démocratisation des plate-formes de modélisation à base d'agents pour qu'une auteure, KLÜGL, se penche véritablement sur l'identification et l'explicitation de la *face validity*, et en donne une définition plus précise, mais englobante car centrée sur les usages plus que sur la méthode en elle-même :

« Face validity can be seen as the result of face validation. Under this paradigm I want to subsume all methods that rely on natural human intelligence. Examples are structured walk-through, expert assessments of descriptions, animations or results. Thus, face validity shows that processes and outcomes are reasonable and plausible within the frame of theoretic basis and implicit knowledge of system experts or stake-holder. Face validation may be applied from the early phases of the simulation study under the umbrella of conceptual validations. It is often also called plausibility checking. [...]

Face validation usually plays an important role during model design. All tests based on reviews, audits, involving presentation and justification of assumptions and model structure are used for reaching this form of plausibility. »

KLÜGL (2008, p. 39–41)

La description des méthodes possibles menant à cette évaluation n'est pas en reste non plus dans cet article, puisque l'auteur identifie trois familles de cette *face validation*, chacune pouvant être menée par des experts différents¹⁸ :

18. L'énumération qui suit est une traduction libre et une reformulation partielle de KLÜGL

Composantes de la *face validation*.

- **Évaluation du déroulement.** Évaluation du déroulement d'une simulation dans son ensemble. Il s'agit ici de juger de la plausibilité des dynamiques (à l'échelle du système dans son ensemble, ou de composantes de celui-ci) reproduites dans la simulation, via une observation en direct de la simulation.
- **Évaluation des sorties.** Cette approche consiste plutôt à une évaluation qualitative des sorties produites par la simulation. Cela peut prendre la forme de vérification des valeurs (approche que l'on retrouve dans les méthodes d'évaluation plus formelles, via une automatisation de ces types d'évaluation) par un expert, mais aussi d'analyse des covariations et évolutions temporelles de différents indicateurs de sortie. L'évaluation des sorties peut être appliquée sur le système modélisé dans son ensemble, mais aussi au niveau des types d'agents mobilisés.
- **Évaluation « immersive ».** Il s'agit ici d'évaluer le modèle au travers de la vraisemblance des actions et réactions individuelles des agents qui y interagissent. L'accent est donc mis sur la plausibilité du comportement des agents (niveau micro), plus que sur celle des dynamiques macroscopiques résultantes. Les experts de ces deux niveaux d'observation peuvent être différents (un psychologue spécialiste des réactions individuelles en cas d'incident ne peut porter un jugement de même niveau qu'un physicien spécialisé dans les dynamiques de foules par exemple), et il faut donc, à chaque niveau d'observation du modèle, faire intervenir un expert adéquat.

Pour l'auteur, ces trois approches d'évaluation sont complémentaires et s'inscrivent dans des temporalités différentes de la phase de vie du modèle. Elle encourage ainsi plutôt à mener l'évaluation des sorties après les deux autres, puisque ces dernières sont comparativement moins coûteuses en termes de calcul (KLÜGL 2008, p. 42).

Il nous semble que si les deux premières approches sont applicables à tout modèle, l'évaluation immersive comporte un postulat lourd sur la rationalité des comportements individuels qui n'est pas universelle dans les modèles à base d'agents. Cela se prête bien à de nombreux modèles où les agents représentent des humains dotés de comportements rationnels, ou encore des particules dont la trajectoire individuelle est prévisible en dehors des effets d'interaction. Toutefois, tout un pan de la modélisation en géographie repose sur des agents non anthropomorphiques, ou encore sur des entités primaires dont seules les interactions ont vocation à faire émerger un comportement d'ensemble. Dans le cas de SimFeodal par exemple ([ref chap2](#)), les comportements individuels des foyers paysans ne reposent pas sur des hypothèses de vraisemblance : le foyer paysan qui se déplace de villes en villes, parfois en faisant des allers-retours, au cours des 300 ans modélisés, ne s'appuie sur aucune connaissance empirique, et tendrait même à contrevenir aux connaissances expertes de la mobilité résidentielle des foyers paysans médiévaux. Le suivi d'un foyer paysan, isolé de ses co-agents, au cours du déroulement du modèle, par un

expert thématicien, n'est donc pas sujet à évaluation, au contraire du suivi des structures spatiales de niveau macroscopique engendrées par cette accumulation de déplacements.

L'évaluation immersive nous paraît donc peu adaptée à l'évaluation de plausibilité de tous les modèles. Notons cependant que même quand elle n'a pas de sens thématique, cette méthode peut toutefois s'avérer utile en matière d'évaluation interne, dans un aspect de « débugage » : quand bien même les réactions et attributs des agents ne reproduisent pas une connaissance experte, l'observation de celles-ci peut toujours servir au modélisateur pour vérifier l'absence de valeurs aberrantes ou encore la juste activation de chacun des mécanismes.

3.1.3.2 Limites

Comme mentionné auparavant (3.1.2), pour de nombreux auteurs (HERMANN 1967 ; BALCI 1994 ; KENNEDY et al. 2006), la *face validation* ne peut qu'être une étape préalable à des méthodes d'évaluation plus quantitatives et formelles. Les raisons données sont souvent le manque d'objectivité d'une démarche fondamentalement basée sur l'expertise et l'impression. Parmi ces auteurs, HERMANN est sans doute celui qui se montre le plus méfiant vis-à-vis de la pratique de la *face validation*, en en pointant plusieurs limites :

« Although face validity has value in the early stages of model building or for quick checks during actual operation, its severe limitations should be recognized. Sometimes the experimenter will not know what behaviors are "realistic" because of his limited experience observing the actual phenomena. Participants can become interested and highly motivated in an incorrect representation of the desired environment. If the simulation involves the substitution of one property for another, some features may appear quite unreal and yet replicate the performance of the reference system for which the simulation was designed. The acceptance of face validity as a rough, first approximation might be improved if the simulator explicitly stated in advance what observations would constitute indications that an aspect of the observable universe had been successfully captured. In summary, face validity in its usual form suffers from the lack of explicit validity criteria. »

HERMANN (1967, p. 222)

Ces réserves nous semblent être autant de pistes pour justifier de l'intérêt d'une démarche scientifique de *face validation*. En reprenant les critiques dans l'ordre énoncé par l'auteur, on peut y répondre ainsi :

- **Manque de connaissance experte.** Cette première remarque nous paraît comme quelque peu biaisée : si l'on confie une évaluation experte à des non experts, naturellement, cela ne peut déboucher sur une évaluation correcte du modèle. Cela est d'ailleurs applicable quelle que soit la méthode d'évaluation : une expertise ne vaut que par la qualité de

l'expert. De manière plus nuancée, on notera d'ailleurs que cette phrase montre ici l'absence d'un élément de définition de la *face validation* partagé par les autres auteurs : HERMANN considère par là que c'est au modélisateur uniquement de mener cette phase d'évaluation, alors que la littérature s'entend quant au fait que ce rôle échoit à des experts. Ce faisant, HERMANN se positionne dans la logique de construction de modèles par des modélisateurs, sans apport des thématiciens, et donc dans l'approche classique de séparation forte entre ces deux acteurs indispensables du modèle (voir chapitre 1, prestation vs co-construction).

- **Invraisemblance de certains comportements.** HERMANN met en avant que dans un modèle, tous les mécanismes n'ont pas vocation à être vraisemblables. Ainsi, en mentionnant ces « propriétés de substitutions », il rappelle un élément important d'une évaluation, quelle qu'en soit la méthode : on ne doit et ne peut juger de la plausibilité que des aspects du modèle qui cherchent à reproduire un comportement plausible. Il nous semble qu'ici aussi, la critique de l'auteur revient à ignorer l'importance du dialogue entre modélisateur et évaluateur, tout en présumant que l'évaluateur ne serait pas le modélisateur : le modélisateur connaît les « substitutions » opérées dans le modèle, et se gardera donc bien de juger de leur vraisemblance. A contrario, un expert thématicien pourrait être étonné par certains comportements micro, dans la mesure où il ne connaît pas les correspondances entre éléments du modèle et éléments du système modélisé. Là encore, cette limite repose donc surtout sur le choix d'un mode de construction isolé, c'est-à-dire n'impliquant pas et le thématicien et le modélisateur.
- **Explication préalable des objectifs.** La dernière remarque de cette citation nous semble, sans conteste, être la plus importante et la plus juste. L'auteur note ainsi que la *face validation* ne peut constituer une méthode d'évaluation adaptée si l'on ne spécifie pas, en amont, les critères qu'elle doit s'attacher à examiner. C'est là encore vrai de toutes les méthodes d'évaluation, mais nous souscrivons aux remarques de HERMANN quant à l'importance primordiale que cela revêt pour la *face validation*. En matière de plausibilité, on pourrait ainsi, comme cela nous semble souvent être le cas, se contenter d'évaluer « à chaud » les différentes dynamiques et sorties d'un modèle, sans s'encombrer d'une démarche, ou feuille de route, spécifique. Le risque est alors d'introduire encore plus de subjectivité dans cette analyse, et en particulier de briser la capacité de reproductibilité ou de justification d'une évaluation : une évaluation peut être subjective tout en étant justifiée, appuyée par des arguments, et dès lors, reproductible si tant est que chacun de ces éléments soit explicités. Quand un modèle est évalué par une seule personne, par exemple un expert thématicien, la nécessité d'une telle démarche est peu visible, chacun étant en capacité d'estimer qu'il sera en mesure de justifier *a posteriori* son évaluation. A contrario, quand un modèle résulte d'un travail collaboratif, qui plus est quand il implique plusieurs évaluateurs, les évaluations d'un même résultat peuvent varier. Il est donc indispensable de les expliciter autant que possible, et pour se prémunir d'un travail gigan-

tesque d'analyse postérieure des résultats tout autant que pour se doter d'un outil de discussion et de débat commun, il apparaît primordial de fixer une grille d'évaluation, ou, en d'autres termes, d'un ensemble de critères à observer. Cela ne limite aucunement la nécessaire subjectivité et complémentarité des évaluateurs experts, mais permet au contraire d'inscrire leurs discours dans un référentiel de comparabilité.

3.1.3.3 Intérêts de la *face validation*

En dépit des limites identifiées ci-dessus, qui nous semblent surpassables à condition de définir une grille d'évaluation précision en amont, la *face validation* présente de nombreux atouts en dehors de la facilité de sa mise en œuvre traditionnelle.

Là où HERMANN et les auteurs classiques cantonnent la *face validation* à une étape préalable à une véritable évaluation, KLÜGL justifie l'intérêt propre de cette démarche méthodologique, y compris dans les phases plus avancées de la démarche classique d'évaluation :

« One may argue why face validity is need, when statistical validation is successfully done ? Face validation assures that the processes and structures are reasonable for a human expert. Especially, when there is (semi-)automatic calibration of a simulation that is used in combination with statistical validation, a careful check of plausibility is necessary. This is in general true for all kinds of simulation, but it is particularly important for agent-based simulations.[...]

Although face validation may be informal and inconsistent, but it at least results in plausibility of modeled processes. Our experience with modeling and simulation in many interdisciplinary projects showed that even the formulation of a plausible model supports theory building and future empirical research. »

KLÜGL (2008, p. 40;43)

Pour l'auteure, la face validation complète ainsi d'autres méthodes d'évaluations mieux considérées, et nous irons même plus loin en considérant que chacune de ces méthodes peut potentiellement être améliorée en la conjuguant à une analyse de plausibilité visuelle de ses résultats.

On notera d'ailleurs que chez BALCI, dans une analyse de l'applicabilité des méthodes de « VV&T » aux différentes phases du cycle de vie d'un modèle, seules 5 techniques¹⁹ (sur 77 analysées) présentent la caractéristique d'être mobilisables à chacune de ces phases (voir la Figure 3.6).

19. Il s'agit systématiquement de méthodes « informelles » : (1) La vérification de la documentation (*Documentation Checking*; (2) la *Face Validation*; (3) les inspections de code; (4) les « revues » de modèle (*Reviews*) et enfin (5) les « procédures pas à pas » d'évaluation (*walk-through*).

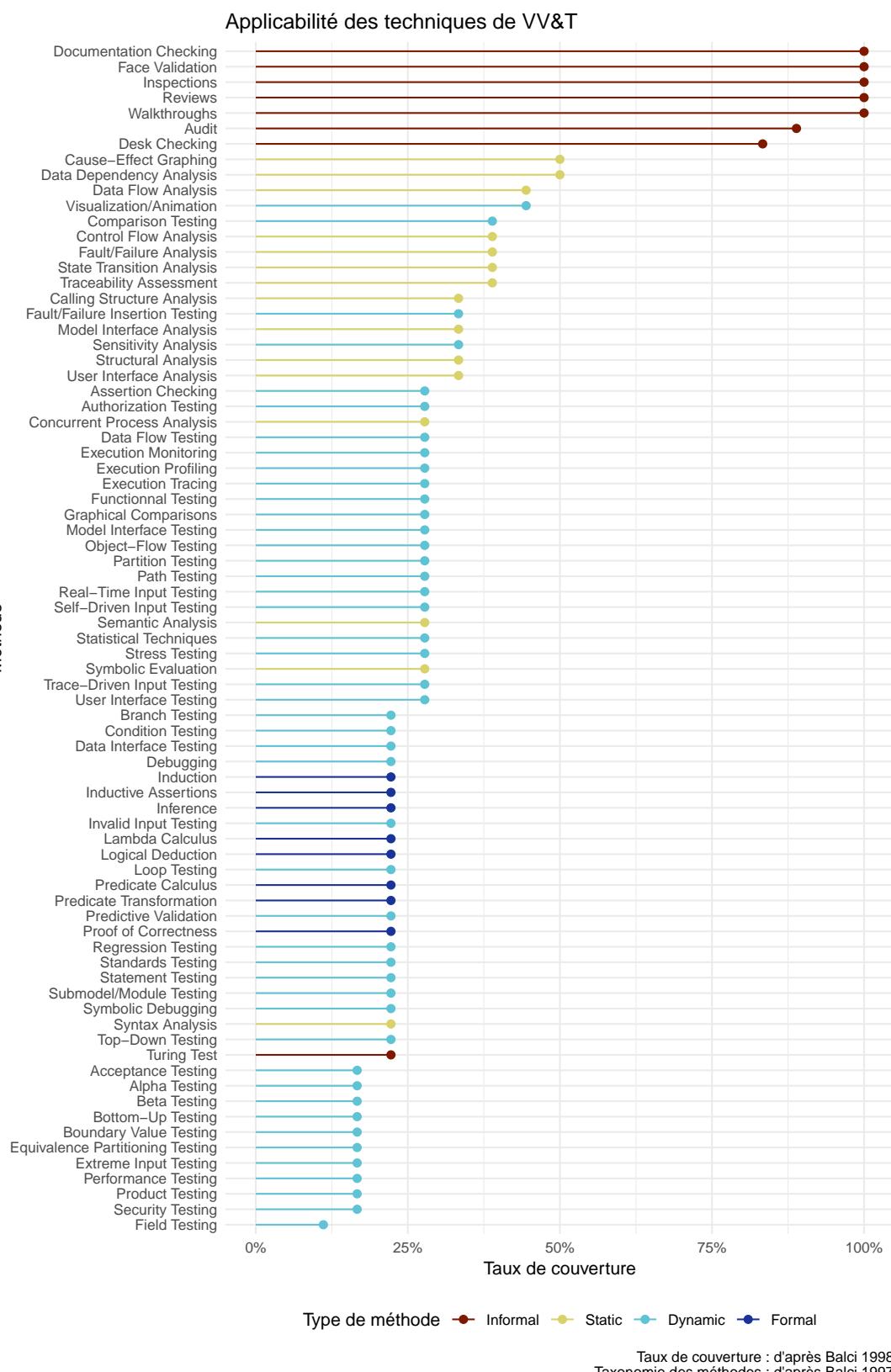


FIGURE 3.6 – Part des étapes de la cycle de vie d'un modèle pour lesquelles différentes méthodes de « VV&T » peuvent être mobilisées, selon le type de méthode (intitulés d'origine).

*Taxonomie des méthodes : d'après BALCI (1997, Figure 2, p. 139);
Taux de couverture : d'après BALCI (1998, Table 3, pp. 45-47).*

3.1.4 Vers une évaluation visuelle

Au regard de ces éléments, cantonnent-ils la *face validation* à une phase préalable mineure ou au contraire à une bonne pratique qui doit être menée

lors de chacune des phases de construction et d'évaluation d'un modèle, il nous semble que l'utilité des approches de *face validation* est assez largement prouvée.

3.1.4.1 Une démarche comparative

Comme identifié en limites et en intérêts, il nous semble de plus que la *face validation* souffre, en matière de réputation, d'un manque de clarification de la démarche qu'elle met en œuvre. Nous considérons que dotée d'un protocole d'évaluation rigoureux, cette méthode peut constituer une alternative crédible à des méthodes d'évaluation plus répandues, par exemple les méthodes statistiques. Ces dernières sont souvent basées sur l'analyse de l'écart entre des données empiriques et des données simulées, et cherchent à quantifier et à minimiser cet écart. La *face validation* procède à la même démarche comparative :

« Face validation is a validation method that compares simuland behavior to model results. [...] Based on their knowledge of the simuland, the observers subjectively compare the behavior of the simuland as reflected in the simulation results with their knowledge of the behavior of the actual simuland under the same conditions, and judge whether the former is acceptably accurate. Differences between the simulation results and the experts' expectations may indicate model accuracy issues.

Nous postulons que la démarche comparative que l'on retrouve dans l'évaluation statistique peut donc être appliquée sans recherche de quantification, c'est-à-dire en évaluant ces mêmes écarts de manière subjective et qualitative. Dans les modèles descriptifs dotés de nombreux indicateurs non résumables, tel que SimFeodal ([ref chap 2](#)), la comparaison terme à terme entre des valeurs numériques est potentiellement possible, mais non ordonnable et ne peut donc déboucher sur un indicateur unique (voir Quels types d'indicateurs pour SimFeodal ?, section 3.2.1.2). De plus, les données empiriques qui permettraient de mener une comparaison sont trop lacunaires et incertaines pour être jugées suffisamment fiables pour évaluer le modèle.

3.1.4.2 Une démarche rigoureuse

Nous pensons toutefois que ces carences quantitatives peuvent être compensés par les connaissances expertes des différents thématiciens impliqués dans la construction et l'évaluation d'un modèle. Ainsi, dès lors que le processus d'évaluation est pensé en amont de son application, et qu'il est possible de parvenir à la création d'une grille d'analyse, c'est-à-dire à un protocole d'évaluation, il nous semble que la différence avec l'évaluation statistique est assez restreinte. Pour évaluer les modèles du type de SimFeodal, nous considérons dès lors qu'il est tout à fait possible de faire reposer cette démarche sur une évaluation experte, s'inscrivant dans les logiques de *face validation*, et en particulier de sa composante d'évaluation des sorties (voir Composantes de la *face validation*, section 3.1.3.1).

3.1.4.3 Un nouveau terme ?

Dans la suite de cet ouvrage, nous nommerons cette approche « **évaluation visuelle** ». Ce terme n'est, à notre connaissance, que peu employé, et le semble surtout en études environnementales, par exemple pour définir une méthode de comptage d'espèces animales et végétales (par exemple HARMELIN-VIVIEN et al. 1985). Le pendant anglophone, la « *visual evaluation* », semble s'inscrire dans le même champ disciplinaire (par exemple HORST, ENGELKE et MEYERS 1984), et paraît aussi assez faiblement utilisée dans un usage scientifique. Dans l'usage qui en sera fait dans ce manuscrit, ce terme est forgé au regard de la « *face validation* » naturellement, et pourrait être confondu avec. Il s'agit toutefois de s'éloigner de l'aspect « *apparence* » présent dans le terme – qui insiste donc sur une validité de façade –, pour embrasser au contraire la méthode visuelle. Cette dernière a fait ses preuves – dans de nombreux autres champs disciplinaires – et constitue un pan non négligeable des méthodes d'analyse, et nous pensons donc adéquat d'en faire un usage argumenté dans le domaine de l'évaluation de modèles de simulations. On notera un usage proche de cette dernière, appliquée aux modèles aussi, mais statistiques cette fois-ci, visant à l'évaluation visuelle de modèles de « *Data Science* ». EILERS et al. (2017) partagent le constat d'une utilité réelle de l'évaluation visuelle (intitulée « *Visual Model Evaluation* » dans leur cas), et mettent une emphase particulière dans l'intérêt des intuitions que peuvent avoir les experts thématiques à la vue des résultats d'un modèle. Pour ce faire, ils insistent sur l'intégration d'experts dans le processus d'évaluation, et sur le besoin de communications, lors de cette phase de travail, entre les modélisateurs et ces experts²⁰.

3.1.4.4 Définir l'évaluation visuelle

Pour définir cette évaluation visuelle, nous repartirons de la définition de la *face validation* sur laquelle cette méthode s'appuie.

Définition. Il s'agit d'évaluer, visuellement, la plausibilité du comportement d'un modèle à partir des données qu'il produit. Cette plausibilité peut être entendue comme la correspondance entre le système modélisé et le modèle du système, correspondance s'exprimant en comparant les données en sortie de simulation – et en les agrémentant au besoin pour tenir compte de la nécessaire réplication²¹ – au comportement du système modélisé. Cette correspondance doit être qualifiée avant de mener cette phase d'évaluation, c'est-à-dire qu'il est

20. « Integrating these expert groups [data scientists and domain experts] to follow a common objective is still a major challenge today for a successful data science project in the industry and therefore a suitable field for information systems research. A collaborative analysis system addressing this issue should therefore focus on both aspects. It is important to most efficiently support human decision-makers with data-driven expert systems, and much research has been carried out in this area (Shim et al. 2002; Power 2008). But it is equally important that domain experts are also part of the system itself, e.g. by supporting data scientists with their domain knowledge when constructing the underlying models. A key success factor for this purpose is communication between different groups. » (EILERS et al. 2017, p. 2)

21. Cet aspect est discuté dans les chapitres 1, 2 et 7. En matière d'évaluation, tel que pointé par la majorité des auteurs cités dans cette sous-partie de chapitre, il est ainsi nécessaire de tenir compte de la variabilité d'un modèle, variabilité intrinsèque dans un modèle stochastique. Il n'est donc pas possible d'évaluer, visuellement ou non, un modèle stochastique sur

nécessaire de spécifier les critères d'observation et les réponses attendues. Ces éléments, les critères d'évaluation, ne peuvent être formulés par n'importe qui : si le modélisateur autant qu'un expert externe peuvent les spécifier, il convient de s'assurer de l'expertise – thématique et de la connaissance du système tel que modélisé – de l'évaluateur. On obtient ainsi un système à évaluer au filtre d'une grille d'analyse qualitative et basée sur le visuel. Il devient alors possible d'apprécier l'écart le modèle et le système qu'il représente, sans chercher pour autant à quantifier ou à mesurer cet écart. Il s'agit en effet plutôt d'ordonner différentes versions ou paramétrages d'un modèle de simulation afin de juger de ceux qui semblent minimiser cet écart.

Cette méthode, contrairement à d'autres, plus quantitatives, permet donc au final de tirer avantage des méthodes qualitatives telles que la *face validation* – par exemple la capacité d'évaluer un modèle qui ne reposera que sur peu de données empiriques ou encore sur des données incertaines –, tout en se conformant à une démarche d'évaluation rigoureuse, loin de l'estimation « au doigt mouillé » à laquelle peuvent donner lieu certaines méthodes reposant sur la plausibilité et l'estimation.

3.1.4.5 Des critères pour l'évaluation : les indicateurs

Dans la présentation de la démarche d'évaluation visuelle, nous précisions que pour que cette évaluation qualitative et experte soit rigoureuse, il était nécessaire de fixer des objectifs de manière préalable, et d'en expliciter la teneur autant que possible.

Pour l'évaluation de SimFeodal, face à la multiplicité des attentes thématiques vis-à-vis du modèle, nous avons choisis de mobiliser à cet effet des « indicateurs de sortie ». Ceux-ci relèvent du domaine de la simulation et leur évaluation doit être guidée par les connaissances empiriques, formalisées au sein d'« indices empiriques » qui correspondent à ces indicateurs.

Pour finir de décrire la démarche d'évaluation de SimFeodal, reste donc à définir plus précisément ces composantes de l'évaluation, ainsi qu'à expliciter les objectifs fixés pour chacun des indicateurs.

la base d'une seule exécution. Au contraire, seule l'exécution d'un certain nombre de **réplications** (voir chapitre 1) permet de s'assurer que le comportement évalué correspond bien au comportement habituel, ou tendanciel, du modèle.

3.2 Une grille d'analyse composée d'indicateurs de sortie

Le modèle SimFeodal présenté dans le chapitre 2 correspond à la « version 6.3 » du modèle souhaité, c'est-à-dire qu'il en constitue une version qui n'est ni la première, ni sans doute la dernière dans cette expérience de co-construction interdisciplinaire de modèle qui s'inscrit résolument dans le temps long. L'ensemble des mécanismes figurant dans le modèle conceptuel ont été implémentés mais l'ensemble des liens, interactions et valeurs de paramètres ne sont pas encore stabilisés. De ce fait les résultats des simulations ne répondent pas nécessairement aux attentes définies dans le chapitre 2.

Si l'on a déjà décrit le principal objectif du modèle dans le chapitre précédent (celui de comprendre les mécanismes sous-jacents au processus de polarisation qui s'est déroulé entre 800 et 1100), il convient ici d'expliciter comment les résultats d'un tel processus peuvent être saisis. Ceux-ci sont en effet nombreux et hétérogènes, concernant aussi bien des concentrations de foyers payans que l'émergence de pôles. Certains sont centraux, d'autres secondaires, et le modélisateur a des attentes relativement à l'ensemble des résultats obtenus en fin de simulation. La description précise de ces attentes se révèle importante dans le cadre du paramétrage – et de l'ensemble des étapes de la vie du modèle – de SimFeodal.

Dans cette partie, on explicitera d'abord le sens que l'on prête à ces attentes, sous la forme « d'indices empiriques » et « d'indicateurs de sortie de simulation ». Ces indices et indicateurs sont nombreux, certains sont multivariés, et il s'agira donc de présenter des méthodes visant à réduire la complexité de ces indicateurs de sortie, en adoptant une démarche proche de ce qui se fait en statistiques : réduction de dimensionnalité et/ou catégorisation et hiérarchisation de ces indicateurs. L'utilisation de ces méthodes permettra, seule, de décrire et qualifier le comportement du modèle SimFeodal tel qu'il a été décrit dans le chapitre précédent, avant d'en analyser les résultats par ce biais dans le chapitre 6.

3.2.1 Indices et indicateurs

On attend d'un modèle, sans entrer encore dans le détail, qu'il reproduise au moins les grands traits de l'élément empirique dont il cherche à rendre compte. Ces grands traits peuvent s'entendre de multiples manières, et se formaliser avec encore plus d'approches. Ici, nous avons souhaité proposer une dichotomie simple entre le domaine de l'empirique et celui de la simulation, en systématisant l'usage d'un vocabulaire qui est souvent employé de manière plurielle. Pour être en mesure d'évaluer la vraisemblance du comportement reproduit par le modèle sur le plan empirique, il est nécessaire de mettre en correspondance des éléments empiriques et des éléments issus de la simulation. Nous caractérisons ces éléments en deux grands ensembles : (1) **les indices empiriques**, éléments quantifiables ou au moins descriptibles émanant du domaine empirique, et (2) **les indicateurs de sortie**, variables informa-

tiques produites par le modèle de simulation et devant pouvoir être comparés à chacun des indices empiriques. La figure 3.7 reprend, sous forme de schéma ontologique synthétique, ces deux ensembles de mesures, explicitant le vocabulaire mobilisé dans cette partie.

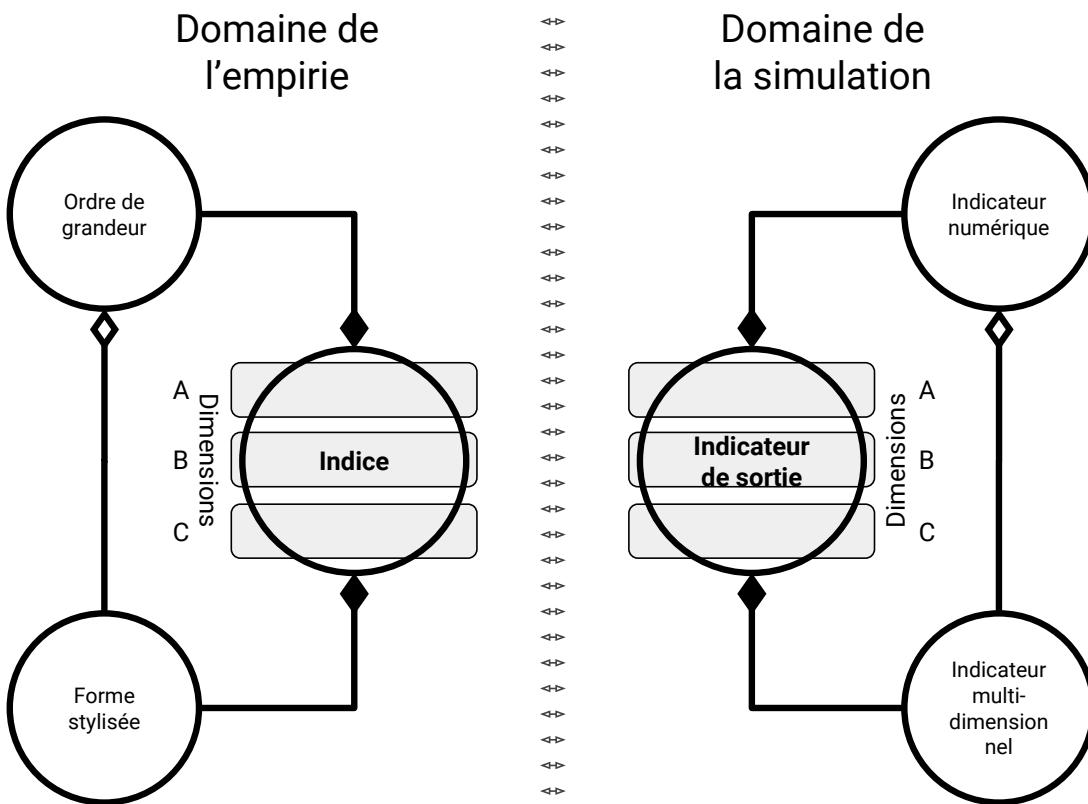


FIGURE 3.7 – Schéma de synthèse des correspondances entre mesures relevant du domaine empirique et mesures issues des simulations pour l'évaluation du modèle SimFeodal²².

3.2.1.1 Les indices empiriques.

Afin d'évaluer la capacité du modèle à reproduire un phénomène observé, il est nécessaire de disposer dans le domaine empirique, de « points de repère ». Selon les modèles, ceux-ci peuvent revêtir de multiples formes et relever de l'ensemble des échelles spatiales et temporelles que l'on choisit de mettre en scène dans le modèle. Leur point commun est qu'ils doivent pouvoir être mesurés, au sens le plus large, c'est-à-dire être en capacité d'être reproduits et comparables avec d'autres mesures. Dans cette étude, on a décidé de qualifier ces points de repère d'**« indices empiriques »** et de les regrouper en deux catégories basées sur la précision avec laquelle ils peuvent être décrits et non sur la précision de leur connaissance, cf. section 3.2.2.1. La figure 3.7 illustre cette catégorisation entre la première catégorie – les ordres de grandeur – et la seconde – les formes stylisées –.

22. La correspondance des éléments est représentée par une symétrie axiale, entre d'un côté des « indices empiriques » et de l'autre des « indicateurs de sortie de simulation ». Les losanges pleins désignent une relation de composition : un « indice empirique » est soit un ordre de grandeur, soit une forme stylisée. Les losanges vides indiquent une relation d'agrégation : une forme stylisée est une agrégation d'ordres de grandeurs. Les dimensions (A à C) regroupent des indices (et les indicateurs qui leur correspondent) qui peuvent être de plusieurs types, et sont elles aussi comparables et en correspondance entre les domaines.

Ordres de grandeur. La première catégorie est constituée d'**ordres de grandeurs** empiriques estimés – avec une précision plus ou moins importante (cf. tableau 3 p. 317 du chap. TMD, à reproduire dans chap 2). Certaines valeurs empiriques sont ainsi connues, que ce soit d'après des sources primaires ou secondaires, et peuvent ainsi constituer des indices. Par exemple, on connaît avec quasi-certitude le nombre d'églises paroissiales de la région Touraine en 1100. D'autres valeurs empiriques sont en revanche issues d'estimations. Tel est le cas, par exemple, du taux de foyers paysans isolés en fin de période. Celui-ci ne peut être renseigné par des sources primaires et il a donc été nécessaire de l'estimer à partir de sources secondaires et en menant des extrapolations. Il est cependant possible de construire des indicateurs de sortie de simulation offrant une correspondance presque exacte de ces différents indices observés ou estimés (cf. Correspondance entre indicateurs de sortie de simulation et indices empiriques, p. 121). Il est dès lors possible de mener une comparaison entre données observées/estimées et données simulées. Ces ordres de grandeur peuvent ainsi participer à l'évaluation du comportement du modèle simulé.

Faits et formes stylisés. La seconde catégorie d'indices empiriques est moins précise et ne repose pas sur une valeur observable ou estimable, mais plutôt sur la connaissance experte d'un phénomène. Il s'agit des « **faits stylisés** »²³, qui rendent davantage compte d'une tendance dans la forme d'une relation ou d'une organisation que les ordres de grandeur. On fait un large usage de ces faits stylisés en économie, mais aussi en géographie, par exemple quand on qualifie la tendance des systèmes de peuplement à se hiérarchiser. La valeur de la pente associée à la courbe rang-taille d'un système de villes a ainsi été décrite comme tendant vers 1 à mesure que le système évolue et se hiérarchise (BERRY et OKULICZ-KOZARYN 2012, in PUMAIN et al. 2015, §9)²⁴. De la même manière, le modèle de transition démographique d'Adolphe Landry est un fait stylisé, énoncé à partir de l'observation de nombreuses récurrences de l'évolution des populations d'un pays en fonction de leurs taux de natalité et de mortalité. Ces exemples montrent qu'au sein des faits stylisés, il y a une certaine diversité quant à la précision de leurs énoncés. On peut ainsi quantifier précisément la courbe d'une relation rang-taille et l'allure de son évolution dans le temps, au moyen de l'évolution du coefficient de sa pente, et ces indices empiriques sont le plus souvent communiqués dans la littérature. Pour la transition démographique, on peut certes l'exprimer sous la forme d'une courbe logistique, mais les paramètres de cette courbe ne sont le plus souvent

23. Définis ainsi par (LIVET, PHAN et SANDERS 2014) : « Un “fait stylisé” est une présentation simplifiée (i.e. taux, ratio ou écart, structure spatiale) d'une régularité empirique sur l'observation de laquelle il y a un large accord. Le terme a été popularisé en économie par Nicholas Kaldor (1961). [Les] faits stylisés peuvent être construits de la manière suivante : 1) en partant du domaine empirique, on identifie des relations saillantes ; 2) on opère quelques simplifications qui permettent d'inclure formellement ces relations dans des modèles ; 3) une fois admis que ces simplifications ne faussent pas trop les choses, on érige ces relations à la fois simplificatrices et formalisables au rang de “faits stylisés”, dont les concepts théoriques doivent rendre compte. »

24. Notons que les auteurs de PUMAIN et al. (2015) contestent justement cette affirmation, en montrant empiriquement que les pentes convergent des valeurs supérieures ou inférieures à 1 en fonction de l'ancienneté de l'intégration des systèmes de ville considérés (CURA et al. 2017a).

pas donnés dans les études thématiques. Le fait stylisé « transition démographique » est ainsi communiqué d'une manière moins précise que le fait stylisé « hiérarchisation d'un système de villes ».

Dans notre cas d'étude, les faits stylisés sur lesquels on s'appuiera seront des d'une part des « allures » de courbes (par exemple l'évolution dans le temps d'un indicateur tel que le taux de concentration des foyers paysans), d'autre part des formes de répartition spatiale (densité du semis d'églises paroissiales par exemple), et enfin des « allures » de courbes résultant d'une composition d'ordres de grandeurs (par exemple la courbe rang-taille correspondant à la hiérarchie des agrégats). Notons que ces formes stylisées relèvent le plus souvent d'une agrégation ou d'une composition d'ordres de grandeurs (comme figuré dans la figure 3.7) : l'évolution dans le temps de la population, par exemple, correspond à un vecteur d'ordres de grandeur, c'est-à-dire à une succession de mesures de la quantité de population pour chaque date étudiée.

3.2.1.2 Les indicateurs de sortie de simulation

Les ordres de grandeur et formes stylisées évoqués relèvent du domaine empirique, c'est-à-dire qu'on dispose de données ou de connaissances d'experts à leur sujet. Afin de pouvoir les mobiliser pour évaluer la capacité du modèle à reproduire le phénomène d'intérêt, il est nécessaire de définir des **indicateurs de sortie** dans le modèle de simulation, c'est-à-dire des variables informatiques que l'on enregistrera durant l'exécution du modèle et que l'on pourra ensuite comparer aux indices empiriques définis.

Définition. Comme pour les indices empiriques qui sont leurs équivalents dans le domaine empirique, on peut définir les indicateurs de sortie de simulation, en distinguant des formes numériques simples (des scalaires), et des indicateurs plus complexes, multidimensionnels. Ces derniers sont en effet nécessaires pour pouvoir confronter les sorties du modèle de simulation avec les formes stylisées identifiées dans le domaine empirique. Chaque indice empirique doit ainsi se voir correspondre, respectivement, un indicateur de sortie (figure 3.7).

Correspondance entre indicateurs de sortie de simulation et indices empiriques. La correspondance entre indicateurs et indices ne correspond pas toujours à une équivalence exacte. En effet, si certains indicateurs peuvent trouver un équivalent strict dans le domaine empirique – le nombre de châteaux connus à chaque date a un sens strictement équivalent au nombre de châteaux simulés par le modèle –, d'autres correspondances sont moins directes.

Il peut s'agir de correspondances ayant trait aux mêmes éléments de base et le passage de l'indicateur à l'indice résulte alors d'une simple conversion. Par exemple, du point de vue empirique, on connaît à peu près les populations de la région étudiée au début et à la fin de la période. Dans SimFeodal cependant, on ne modélise pas des individus en tant que tels, mais des foyers paysans. Le nombre de foyers paysans simulé n'est pas directement comparable à la population estimée, mais en supposant une moyenne de 4 ou 5 habitants par

foyer paysan, il est possible d'en déduire un nombre d'habitants.

Dans d'autres cas enfin, le décalage entre indicateurs et indices est plus important. Il s'agit notamment de caractéristiques du système féodal que l'on sait importantes mais pour lesquelles on ne dispose pas de données facilement quantifiables. La puissance militaire des seigneurs, par exemple, est complexe à quantifier. On sait d'après connaissances expertes que la hiérarchie des puissances était forte à l'époque étudiée, majoritairement dominée par deux seigneurs (les comtes de Tours et de Blois) et assortie d'une grande quantité de petits chevaliers. On sait de plus qu'avec les liens de vassalité, les grands seigneurs disposaient des forces militaires des seigneurs qui leur étaient assujettis. Dans le domaine empirique on ne dispose pas d'éléments plus précis pour quantifier la puissance militaire des seigneurs. Dans le domaine du modèle, en revanche, on a défini un indicateur « proxy » de cette puissance à partir du nombre de foyers paysans s'acquittant de droits à chaque seigneur. De cette manière, on peut observer précisément en sortie de simulation la hiérarchie implicite entre les seigneurs reproduite par le modèle, avec une quantification de leurs puissances respectives. Ces éléments peuvent être comparés aux connaissances empiriques sur ces rapports de puissance entre les seigneurs à différents moments de l'époque féodale.

Les correspondances entre indicateurs de sortie et indices empiriques sont ainsi de nature multiple, reflétant différents niveaux de proximité entre le concept mobilisé dans le modèle et ce qui est observable dans le domaine empirique : les châteaux, entités d'intérêt dans le modèle, ont un équivalent direct dans le domaine empirique (il s'agit d'entités facilement observables et des données historiques les concernant sont disponibles) alors que la puissance militaire des seigneurs, élément moteur dans le modèle, a conduit à utiliser une variable dans le modèle pour laquelle on ne dispose pas d'observations empiriques.

La création d'indicateurs de sortie correspondant aux indices empiriques permet donc de quantifier une information qui n'est pas forcément aisément quantifiable dans le domaine empirique.

Indicateur composite. La forme « informatique » (numérique ou multidimensionnelle) des indicateurs de sortie permet de trouver des manières plus simples d'évaluer le modèle que d'observer l'ensemble des indicateurs. Chaque indicateur étant numérique, il devient en effet possible de les combiner au sein d'indicateurs composites, résultant en quelques indicateurs synthétiques permettant une évaluation plus rapide des résultats d'une simulation. Ces indicateurs composites sont très fréquemment utilisés en statistiques, permettant par exemple de résumer une information multidimensionnelle en un indicateur simple. L'Indice de Développement Humain (IDH), par exemple, est un indicateur composite dépendant de l'espérance de vie à la naissance, du niveau d'éducation et du niveau de revenu de chacun des pays caractérisés. On le trouve très souvent utilisé, parce qu'il permet de résumer le niveau de développement d'un pays en agrégant trois dimensions majeures, l'aspect sanitaire, culturel et économique.

Fonction objectif. En renforçant cette logique de synthèse de plusieurs dimensions, on peut aller plus loin dans la définition d'un unique indicateur, parfois composite et synthétique, qui permet d'évaluer seul la qualité de représentation d'un modèle. On nomme d'ordinaire cet indicateur « fonction objectif » (ou « fonction de *fitness* »). C'est une pratique très fréquente, qui plus est dans le domaine de la simulation informatique en particulier sur des modèles de type « KISS » (ref. chap 1 ou 2). Il s'agit alors de définir une « fonction objectif », parfois composée d'une pondération des quelques indicateurs composites qui auront été identifiés, ou plus simplement, basée sur une unique variable que l'on juge représentative de l'ensemble du modèle.

Être en mesure d'évaluer un modèle à l'aide d'un unique indicateur a des avantages majeurs en pratique. Cela permet par exemple d'explorer et de paramétriser un modèle de simulation de manière entièrement automatique puisqu'on peut alors générer une cartographie simple des résultats du modèle en fonction des valeurs de paramètres utilisés (voir CHÉREL, COTTINEAU et REUILLOUN 2015, par exemple).

Ces indicateurs composites et synthétiques résultent d'une quantification des autres indicateurs (excluant donc les formes stylisées qui sont plus libres d'interprétation), et apportent un grand confort dans le paramétrage d'un modèle de simulation.

Quels types d'indicateurs pour SimFeodal ? SimFeodal n'est pas adapté à de tels indicateurs, parce qu'une large partie des faits stylisés et ordres de grandeur mobilisés proviennent de connaissances expertes, et les thématiciens qui les ont consolidées rechignent à créer de tels indicateurs composites. Ces derniers demandent en effet de pondérer précisément l'importance de chacun des indicateurs par rapport aux autres. Pour pouvoir pondérer cette importance, il faudrait de plus que les différents indices empiriques mobilisés présentent le même niveau de certitude, et que les indicateurs de sortie aient des variabilités similaires. Cela n'est le cas ni des indices empiriques sur lesquels SimFeodal s'appuie, ni des indicateurs de sortie que le modèle produit.

On aurait ainsi pu créer quelques indicateurs composites, mais ceux-ci n'auraient pas eu de véritable correspondance dans le champ empirique, les thématiciens ne faisant pas appel à des indices empiriques de telle sorte. Un indicateur composite serait donc nécessairement « hors-sol », et qui plus est, perdrat beaucoup dans la finesse de description du système modélisé.

Par exemple, pour caractériser la polarisation du système de peuplement, il pourrait suffire de définir un indicateur composite fonction du niveau de concentration – le taux de foyers paysans dispersés –, du nombre de pôles et de l'espacement moyen entre les agrégats. Les valeurs de l'indicateur généré pourraient renseigner efficacement sur la capacité d'un ensemble de valeurs de paramètres à reproduire le phénomène de polarisation attendu. Cette information serait cependant grossière, dans la mesure où seraient agrégées dans le groupe des « simulations réussies » des configurations extrêmement diverses. L'information fournie risquerait alors d'être très éloignée des connaissances

empiriques des thématiciens : une information multivariée ne peut pas toujours être résumée, en gardant tout son sens, par une seule variable (de manière univariée).

On a donc fait le choix d'évaluer SimFeodal en conservant des indicateurs de sortie non composites. Ce choix a toutefois des implications majeures pour la méthodologie mise en place pour l'analyse des sorties de simulation. Il est ainsi bien plus simple d'analyser quelques indicateurs synthétiques plutôt qu'un grand nombre d'indicateurs hétérogènes.

3.2.2 Hiérarchiser et catégoriser les indicateurs

SimFeodal s'appuie sur une dizaine d'indicateurs numériques, ainsi que sur plus d'une trentaine d'indicateurs multidimensionnels. Tous ces indicateurs ne présentent pas le même degré de certitude, la même échelle d'observation, et surtout, le même niveau de précision sur les phénomènes modélisés. À chaque changement dans le modèle, pour une évaluation complète de la capacité de cette version à reproduire les indices empiriques, il faudrait donc observer et analyser chacun de ces nombreux et divers indicateurs. Dans le contexte du paramétrage d'un modèle s'appuyant sur une logique itérative et incrémentielle (voir Encadré 3.2), on imagine bien que cela n'est pas possible : le nombre d'indicateurs est bien trop élevé pour avoir rapidement une vision globale de la qualité de représentation du modèle. Il faut dès lors, comme pour toute analyse synthétique, concevoir une hiérarchie d'observation et d'utilisation des indicateurs : il ne sera pas nécessaire d'analyser chacun des indicateurs dans la plupart des cas, seuls les indicateurs jugés plus importants pourront être analysés. Les indicateurs de moindre importance ne seront mobilisés que pour départager des situations dont la différence ne serait pas suffisamment explicitée par l'usage des indicateurs principaux.

3.2.2.1 Incertitude

Dans le modèle de simulation, les indicateurs de sortie sont à analyser en tenant compte de la précision des indices qu'ils représentent. Il ne faudra ainsi pas étudier la croissance du nombre d'agrégats au cours de la simulation de manière fine, par exemple en étudiant le coefficient directeur de la courbe, quand l'empirie ne donne quasiment aucune information à ce sujet si ce n'est qu'il y a bien plus d'agrégats en fin de période qu'au début. On peut vouloir quantifier la précision de ces données, par exemple à l'aide des méthodes développées dans le champ des observations floues et/ou incertaines (voir par exemple le travail de Cyril de Runz sur les données « imparfaites » (DE RUNZ 2008)). Cette quantification de l'incertitude pourrait alors servir de base à l'établissement d'une hiérarchie des indicateurs : on analyserait en premier lieu l'écart entre les ordres de grandeurs empiriques bien connus (**cf. tableau du niveau de certitude des objectifs**) et les indicateurs calculés sur les données simulées. Les ordres de grandeur plus incertains seraient analysés dans un second temps (augmentation de la charge fiscale entre 800 et 1100 par exemple), et les formes stylisées viendraient enfin clore cette hiérarchie

d'indicateurs. Toutefois, SimFeodal se caractérise d'une part par une très forte hétérogénéité dans les niveaux de connaissance des ordres de grandeurs et faits stylisés modélisés, et d'autre part, se voulant un modèle théorique ([ref dans chap1](#)), il n'y a pas d'obligation de « coller aux données » à tout prix : la vraisemblance d'ensemble du modèle compte bien plus que la précision de chacune de ses composantes.

3.2.2.2 Catégoriser les indicateurs : définir des dimensions d'analyse

En présence de plus d'une quarantaine d'indicateurs, il est toutefois nécessaire, a minima, d'organiser leur analyse. On a vu qu'il n'était pas justifié de mener cet ordonnancement à partir des propriétés intrinsèques des indicateurs du modèle. Au contraire, et cela porte bien plus de sens vis-à-vis du rôle d'un modèle, la hiérarchisation des sorties du modèle doit suivre la hiérarchie implicite qui structure les hypothèses et objectifs du modèle en lui-même. Ces hypothèses et objectifs sont multiples dans SimFeodal, et dès lors, une hiérarchie globale ne peut être définie. Il convient donc de catégoriser les indices empiriques – et les indicateurs de sortie de simulation leur correspondant –, avant d'organiser, au sein même de ces catégories, les indices les caractérisant. La hiérarchisation des indicateurs se fera donc relativement à chacune de ces catégories.

Dans le chapitre précédent ([ref chap 2](#)), nous présentions les principales dynamiques à reproduire avec le modèle SimFeodal : (1) polarisation, (2) hiérarchisation et (3) fixation des foyers paysans. En postulant que ces dynamiques sont caractéristiques du modèle, on peut s'appuyer sur cette triade pour caractériser les sorties du modèle, c'est-à-dire mener la confrontation entre indices empiriques et indicateurs de sortie. En reprenant ces catégories, que l'on nommera **dimensions** (voir figure 3.7), on va donc répartir chacun des indicateurs dans la dimension qu'il sera le mieux en mesure de décrire. Cette répartition n'a pas à être égale, chaque dimension pouvant s'appuyer sur un nombre différent d'indicateurs. De même, chaque dimension sera composée d'indicateurs dotés d'une qualité de représentation ou d'un niveau de certitude hétérogène. Le seul point commun des indicateurs de sortie de chaque dimension doit être thématique. Les trois dimensions choisies – polarisation, hiérarchisation et fixation –, et les indicateurs qui les caractérisent dans le modèle, sont dès lors considérés comme les trois dimensions d'analyse des sorties de SimFeodal.

3.2.2.3 Hiérarchiser les indicateurs dans chaque dimension

Chacune de ces dimensions s'applique à plusieurs types d'agents du modèle. Pour définir la hiérarchie interne aux dimensions, on retiendra les agents les plus impactés par les dynamiques correspondant à ces dimensions : la polarisation, par exemple, peut être observé depuis le point de vue de ce qui polarise (les attracteurs) tout autant que de ce qui est polarisé (les foyers paysans). On aura alors tendance à examiner d'abord un indicateur de sortie caractéristique mono-dimensionnel, caractéristique de la structure dans son ensemble à son état final. Les indicateurs de sortie représentatifs des dynamiques, par

exemple les indicateurs multi-dimensionnels, ayant mené à cette structure finale, seront étudiés dans un second temps. Dans cet exemple, on analysera donc d'abord le résultat effectif de la polarisation, c'est-à-dire la concentration des foyers paysans en agrégats, avant d'observer la répartition et la diversité des attracteurs ayant entraîné ce phénomène. On peut dès lors définir des « indicateurs principaux » pour chaque dimension, représentatifs des grands traits des structures auxquelles on souhaite aboutir en sortie de simulation, et des « indicateurs secondaires », permettant d'affiner l'évaluation de chacune de ces dimensions.

3.2.2.4 Une hiérarchie mouvante

Notons que l'analyse des indicateurs de sortie suit une hiérarchie parfois mouvante, et en tous les cas, assez peu quantifiable : si l'ordre d'observation est plutôt stable, l'importance que l'on portera à chacun des indicateurs peut varier. Les indicateurs principaux de chaque dynamique sont ainsi « incontournables », c'est-à-dire qu'un résultat trop loin de celui des indices empiriques est disqualifiant. Parmi les indicateurs secondaires, il n'est pas toujours possible, d'après les connaissances des experts sur le sujet, d'établir une priorité ou une pondération de chaque indicateur. L'évaluation de la polarisation par exemple (section 3.2.3.1), se définit principalement par rapport à un indicateur principal – le taux de foyers paysans dispersés –, mais selon les résultats des autres indicateurs de sortie, on leur attribuera une importance variable. L'étude de la dispersion des agrégats et pôles peut ainsi se révéler plus importante que celle de l'évolution du nombre d'agrégats selon les paramètres que l'on souhaite ajuster, ou se montrer tout au moins plus différenciante selon l'état du paramétrage.

Encadré 3.2 : Incrémentalité des indicateurs

De la même manière que les paramètres et mécanismes d'un modèle de simulation tendent à évoluer^a au cours du temps de la construction, souvent afin d'affiner un comportement observé, les indicateurs de sortie sont amenés à évoluer aussi.

Ainsi, en cas de modifications fines du modèle, il est fréquent que les indicateurs initialement choisis ne suffisent plus à départager des versions du modèle quant à un phénomène spécifique. Par exemple, quand on observe le phénomène de polarisation dans les sorties de SimFeodal, l'indicateur du nombre d'agrégats est extrêmement synthétique et informatif jusqu'à ce que l'objectif soit atteint ou que les modifications ne parviennent plus à le faire évoluer. À partir de ce moment, afin d'améliorer la vraisemblance de la situation simulée par le modèle, on peut se focaliser sur la distribution spatiale de ces agrégats, par exemple pour vérifier qu'ils sont bien répartis de manière homogène dans l'espace, et non trop concentrés.

L'observation de la répartition spatiale requiert certes de nouvelles analyses, mais surtout, par exemple, d'enregistrer les positions des agrégats

au cours du temps. Si cet indicateur de sortie n'était pas utile avant cela, il n'y avait aucun intérêt à l'enregistrer. Il faut donc adapter l'implémentation du modèle pour générer, faire évoluer et enregistrer une nouvelle variable informatique correspondant à cet indicateur. Dès lors, on pourra composer un nouvel indicateur synthétique, qui, dans cet exemple, pourrait prendre la forme d'un indice de concentration spatiale.

Ce procédé incrémental dans la construction des indicateurs est très fréquent, mais pose toutefois un problème majeur : sauf à adapter chacune des anciennes versions du modèle implémenté pour y ajouter l'enregistrement des nouveaux indicateurs nécessaires, on ne pourra rendre strictement comparable les sorties de toutes les itérations du modèles informatique. Et même alors, il faudrait ré-exécuter des réplications de chaque version du modèle implémenté à chaque ajout d'indicateur, quand bien même les indicateurs présents initialement étaient jugés suffisants. Un dernier obstacle est plus gênant : certains indicateurs sont spécifiques à des mécanismes, et en cas de changement de ces derniers, ils peuvent ne plus être calculables ou simplement comparables. Par exemple, des versions antérieures du modèle enregistraient les comportements individuels des foyers paysans quant à leur « choix » de déplacement, selon qu'ils étaient à l'origine localisés dans un agrégat ou dispersés. Une simplification du modèle a abouti à la modification des règles différenciant les possibilités de déplacement : on n'observe plus si le foyer paysan est dans un agrégat, mais plutôt s'il est dans un agrégat doté d'un pôle d'attraction. Dès lors, les analyses basées sur les choix de déplacement des foyers paysans selon leur origine ne sont plus comparables avec celles des versions antérieures au changement dans le modèle, quels que soient les détails d'implémentation de ce dernier.

Ces éléments expliquent que dans les résultats de chaque étape du paramétrage du modèle, on ne présente pas systématiquement l'ensemble des indicateurs, y compris quand ceux-ci pourraient être plus pertinents que les indicateurs présentés.

a. De manière incrémentielle et itérative, voir [dans le chapitre x ?](#) et THOMAS 2012, <http://itsadeliverything.com/revisiting-the-iterative-incremental-mona-lisa>

3.2.3 Les indicateurs et dimensions de SimFeodal

3.2.3.1 Évaluer la polarisation des foyers paysans

La polarisation des foyers paysans dans l'espace du modèle est sans doute la dimension principale des dynamiques spatiales que l'on cherche à reproduire. Rappelons ici que l'on estime, à partir des connaissances d'experts, que les foyers paysans sont très majoritairement dispersés en 800, et concentrés au sein de villages et petites villes en 1100. Le modèle cherche à reproduire cette polarisation, par le biais d'une concentration des foyers paysans, initialement localisés aléatoirement dans l'espace mais n'en parsemant qu'une faible part, en des agrégats de foyers paysans répartis dans une plus large partie de l'espace modélisé.

Pour analyser la polarisation du système de peuplement, il est nécessaire de définir des indices permettant de caractériser ce phénomène. Ces indices doivent d'une part avoir une logique thématique, c'est-à-dire être appropriés à la description et à l'étude de la polarisation, mais doivent pouvoir être produits et enregistrés dans le modèle de simulation, formant des indicateurs. Il est nécessaire de faire appel à des indices hétérogènes, chacun devant être en mesure de décrire les différents aspects du phénomène de polarisation. En conséquence, on a choisi de faire appel à plusieurs indicateurs qui doivent permettre d'étudier aussi bien l'aspect structurel du système simulé en son état final que la forme et la tendance que prennent les changements qu'il subit.

L'indicateur principal est le taux de dispersion des foyers paysans. Si celui-ci est trop important (c'est-à-dire très supérieur aux valeurs estimées empiriquement), cela signifie que la polarisation générée par le modèle est insuffisante, et dès lors, obligatoirement insatisfaisante. A contrario, une valeur trop faible serait symptomatique d'un emballement des mécanismes simulés, figeant la situation dans une concentration absolue des foyers paysans, ne laissant dès lors plus de place à la diversification des situations locales et de la hiérarchisation d'ensemble.

Pour affiner ce constat, on fait appel à d'autres indicateurs : le nombre d'agrégats, de pôles, ou encore la dispersion spatiale de ces deux types d'entités. Ces indicateurs ne permettent pas, à eux seuls, de caractériser le succès de la dynamique de polarisation modélisée, mais ils aident à affiner l'analyse de cette dynamique telle que produite par le modèle de simulation. Ils éclairent ainsi le phénomène de polarisation sous des angles légèrement différents, ayant plus pour objet de diagnostiquer les problèmes potentiels qui mèneraient à une mauvaise polarisation plutôt que de qualifier celle-ci. Par exemple, la dispersion des agrégats et pôles peut renseigner, une fois le taux de foyers paysans dispersé jugé trop important, sur une des raisons probables de ce résultat non satisfaisant. Il s'agit donc d'indicateurs secondaires, permettant de préciser la capacité du modèle à reproduire les faits stylisés, alors que l'évaluation de cette capacité est surtout le rôle de l'indicateur principal.

Taux de foyers paysans dispersés. Cet indicateur, et sa déclinaison temporelle, sont vraisemblablement les plus évidents : plus le taux de foyers pay-

sans dispersés en fin de simulation est faible, plus le système de peuplement est polarisé. La « déclinaison temporelle » mentionnée juste au-dessus permet d'affiner légèrement la précision de l'information communiquée par cet indicateur. Il faut certes atteindre un objectif quantifié (20%), mais les hypothèses empiriques permettent aussi de penser qu'il faut que l'évolution de cet indicateur au cours du temps présente une tendance stable à la baisse, diminuant ainsi plus ou moins, avec de faibles fluctuations à chaque pas de temps.

Nombre d'agrégats. Puisque les foyers paysans se concentrent au sein d'agrégats, il est logique d'observer l'évolution de ces derniers. Là aussi, on peut considérer qu'un nombre d'agrégats en fin de simulation proche de l'objectif – 200 –, permet de caractériser une polarisation réussie. Cet indicateur ne peut être lu seul, et c'est pour cela qu'il vient dans un second temps. En effet, un faible nombre d'agrégats peut aussi bien être révélateur d'une très faible polarisation des foyers paysans (ceux-ci restant dispersés) que d'une trop importante (un unique agrégat concentrant l'ensemble des foyers paysans par exemple).

On s'attend à ce que le nombre d'agrégats, très faible au départ, suive trois phases : une première phase de croissante lente, le temps que les mécanismes agissent sur la polarisation, suivie d'une période de croissance plus rapide, une fois que tous les foyers paysans commenceront à être suffisamment attirés par les pôles pour y former des agrégats, et enfin, une nouvelle phase de croissante plus lente, une fois les foyers paysans répartis dans les agrégats existants et qui se déplaceront vers des agrégats plus importants, hiérarchisant le système de peuplement. Cette allure d'évolution, en « S », rappelle les fonctions logistiques connues par exemple pour les cycles de diffusion/adoption des innovations (HAGERSTRAND 1952, in DAUDÉ 2002, p. 28).

Nombre de pôles. Dans le modèle SimFeodal, les foyers paysans sont polarisés par des pôles d'attraction. Pour une polarisation efficace, il est donc nécessaire que les pôles soient suffisamment nombreux, c'est-à-dire, *a minima*, autant que d'agrégats attendus (200). Contrairement aux agrégats, un nombre trop important de pôles ne constitue pas un problème : en considérant que 20% des foyers paysans doivent demeurer isolés en fin de simulation, il est vraisemblable qu'une partie des pôles, par exemple composés d'une église paroissiale, n'aient pas vocation à voir la constitution d'un agrégat autour d'eux.

Par ailleurs, afin de renforcer la polarisation par l'action de l'attraction différenciée, il faut que le taux de pôles contenant un agrégat soit important, et surtout croissant au cours du temps : comme dans l'empirie, cela est alors le marqueur que de petits pôles d'attractions, comme les églises paroissiales, parviennent à polariser suffisamment de foyers paysans de leur voisinage pour aboutir à la création d'un petit agrégat, un village par exemple.

Pour un résultat satisfaisant, il faut donc que le nombre de pôles augmente régulièrement au cours de la durée de la simulation, et que le taux de pôles contenant un agrégat augmente lui aussi de manière continue.

Dispersion des agrégats et pôles. La distribution spatiale des agrégats et des pôles est un facteur majeur de la polarisation. S'ils sont très concentrés, les foyers paysans non présents alentours ne trouveront pas d'attracteurs à proximité, et ne seront de plus pas particulièrement affectés par l'augmentation des droits et des contraintes spatiales (proximité à une église, à un château, etc.). À l'inverse, des agrégats entièrement dispersés ne favoriseraient pas la structure spatiale hiérarchisée que l'on cherche à faire émerger.

Afin que le comportement du modèle soit satisfaisant, il faut donc que les pôles et agrégats occupent l'ensemble de l'espace du modèle, tout en présentant des zones de concentration relatives plus importantes. Comme on ne peut agréger les représentations spatiales, il convient, pour cette analyse, de regarder individuellement un échantillon de configurations spatiales générées.

3.2.3.2 Évaluer la hiérarchisation du système de peuplement

La seconde dimension de l'évaluation du modèle SimFeodal correspond à l'étude de la hiérarchisation du système de peuplement. On déduit en effet des connaissances empiriques une forte hiérarchisation du système de peuplement sur la période, et plus généralement, des entités présentes. On passe ainsi, en 800, d'un habitat dispersé dans lequel coexistent quelques agrégats de taille uniforme, à un habitat concentré dans des agrégats de taille très hétérogènes à la fin du XII^e siècle. La distribution des tailles des agrégats est estimée par les connaissances expertes, toutes proportions gardées, comme assez proche des distributions observées aujourd'hui dans les systèmes de peuplement. On souhaite ainsi que les agrégats modélisés suivent une distribution approchant la distribution log-normale.

Par extension, et là encore d'après les connaissances thématiques, l'ensemble des entités doit aussi suivre le même type de forme. Par exemple, les pôles, tant en terme d'attractivité que de composition, doivent aussi montrer une hiérarchie du même ordre, ainsi que les seigneurs – à travers leur puissance, au moins pour les petits seigneurs –, ou encore les paroisses, par le nombre de paroissiens qu'elles desservent.

Comme pour l'étude de la polarisation, on peut définir un indicateur principal de cette hiérarchisation du système de peuplement : la forme de la distribution de la composition en foyers paysans des agrégats.

De la même manière que pour la polarisation, les indicateurs secondaires ont aussi pour but de préciser cet indicateur principal, et en particulier d'analyser les moteurs de cette hiérarchisation du peuplement. On a en effet choisi d'observer plutôt la hiérarchisation des autres types d'entités – pôles, seigneurs, paroisses –, pour vérifier qu'elles accompagnent ou entraînent bien la hiérarchisation des agrégats. La hiérarchie des pôles, par exemple, a une influence directe sur l'attraction effectuée sur les foyers paysans (polarisation) et sur la hiérarchisation des agrégats : par effet d'attraction différenciée, des agrégats plus importants se constituent autour des pôles les plus importants.

Comme pour la polarisation, l'analyse de la capacité du modèle à repro-

duire la hiérarchisation du système de peuplement se fait donc en deux temps : en premier lieu, on évalue cette capacité à l'aide de l'indicateur principal, puis on précise cette qualification et on essaie de l'expliquer à l'aide des indicateurs secondaires.

Hiérarchie des agrégats. L'indicateur principal est un indicateur agrégé, correspondant à la forme de la distribution des agrégats mesurés par le nombre de foyers paysans qui les composent. Cet indicateur est classique dans l'analyse des systèmes de peuplement, et il est courant de l'observer par le biais d'un indicateur agrégé simple, correspondant à la loi rang-taille. On observe pour cela le modèle statistique, ou sa représentation graphique tout du moins, mettant en relation le logarithme de la taille des individus (le nombre de foyers paysans composant chaque agrégat ici) et le logarithme du rang de cet individu.

Comme pour toute régression linéaire, on peut alors quantifier l'ajustement du modèle grâce au coefficient de détermination (R^2), et spécifier la pente de la courbe, représentant le degré de hiérarchie, à travers le coefficient directeur (a dans la formule $y = ax + b$). Dans le cas de SimFeodal, le faible nombre d'agrégats ainsi que la variabilité de leurs tailles rend difficile cette analyse quantifiée, le coefficient directeur, par exemple, étant très sensible aux faibles effectifs. On utilise toutefois la représentation graphique décrite comme un indicateur majeur de la hiérarchie des agrégats.

Du point de vue des connaissances empiriques, la courbe doit ainsi voir sa pente augmenter avec le temps, tout en devenant plus convexe, ce qui représente la « longue traîne » des petits agrégats, empiriquement observée dans toutes les distributions de systèmes de peuplement.

Hiérarchie des pôles. La hiérarchie des agrégats donne une bonne vision agrégée de la hiérarchisation du système de peuplement dans son ensemble. Pour autant, afin d'appréhender la dynamique de cette dimension, il est là encore nécessaire d'observer le comportement des composantes qui provoquent cette hiérarchisation. En effet, une forte hiérarchie des pôles entraînera une attractivité des foyers paysans très inégale. De plus, comme indiqué plus haut, on cherche à obtenir une forte hiérarchie pour les différents types d'agents du modèle. L'observation de la hiérarchie des pôles est donc importante pour évaluer le modèle SimFeodal.

Pour déterminer cette hiérarchie, on peut se fier à deux indicateurs complémentaires : le nombre d'attracteurs composant chaque pôle et l'attractivité de ces derniers. Ces indicateurs de sortie sont proches, mais apportent pourtant une vision légèrement différente. Comme chaque attracteur influe différemment, selon son type, sur l'attractivité globale d'un pôle, l'information sur l'attractivité et sur la composition ne sont pas redondantes, bien que fortement corrélées.

À partir des connaissances expertes qui guident l'évaluation de SimFeodal, on cherche à obtenir, pour ces deux indicateurs, une courbe d'allure similaire : décroissante, avec bien plus (relation log-normale) de pôles mineurs (faible

attractivité ou nombre d'attracteurs) que de pôles plus importants.

Hiérarchie des paroisses. À l'instar des pôles, on attend aussi des ressorts paroissiaux d'être hiérarchisés. La période modélisée voit ainsi apparaître ces paroisses qui auront un rôle majeur dans la fixation du peuplement, et, préfigurant le maillage communal, ont un double rôle de desserte efficace²⁵ et équitable²⁶. Une structure double en résulte. Dans les zones les moins denses, le maillage est régulier mais lâche, de manière à minimiser le nombre d'églises paroissiales tout en s'assurant que chacun puisse y accéder dans un temps raisonnable²⁷. Il y a donc un certain nombre d'églises paroissiales desservant peu de paroissiens.

Dans les zones les plus denses, et en particulier au sein des petites villes naissantes, l'objectif est d'être au plus près des résidents tout en garantissant à chacun de pouvoir assister aux différents offices. Il y a alors une croissance du nombre d'églises paroissiales proches les unes des autres, visant à accompagner un encadrement maximum de la population, ainsi, avec une logique concurrentielle de ce clergé féodal, qu'à capter l'importante source de revenus qu'assure la collecte de la dîme. Cette logique concurrentielle doit aussi permettre de restreindre le nombre de foyers paysans desservis par une unique paroisse.

On s'attend donc à avoir une courbe hiérarchisée dans la lignée d'une courbe log-normale, mais fortement « coudée » pour rendre compte des deux tendances connues : une courbe à la hiérarchie peu marquée pour les paroisses urbaines (dont la démultiplication dans les zones très peuplées devrait en atténuer la variabilité), en haut de hiérarchie, et une importante « longue traîne » pour les paroisses « rurales »

3.2.3.3 Évaluer la fixation et la dissémination du peuplement

La dernière dimension étudiée par SimFeodal est moins définie que les précédentes. On y observe ainsi la fixation du système de peuplement au sein du maillage naissant que constituent les paroisses. Cette notion de fixation pose problème par rapport à l'ensemble des indicateurs de sortie déployés jusqu'ici. En effet, SimFeodal est un modèle fondé sur un temps discret : on y observe, à chaque itération, le résultat des processus modélisés.

Quand on parle de fixation de l'habitat paysan, empiriquement, on observe les foyers paysans, et non les agrégats dont l'on peut facilement dire s'ils sont stables ou non. Quand on remarque que les agrégats semblent stable, on ne communique en fait aucune information sur les foyers paysans. On approche là à la différence entre un état stable et un état stationnaire. La relative stationnarité des agrégats dans le temps n'est ainsi pas garante de stabilité de leurs

25. Desservir de manière optimale la plupart de la population.

26. Faire en sorte que même les populations les plus isolées aient un accès rapide à une église paroissiale.

27. Cette distance-temps évolue au cours du temps, en fonction de l'accroissement de la fréquence de l'obligation de fréquentation des églises paroissiales.

composantes : deux foyers paysans oscillant d'un agrégat à un autre, dans un mouvement opposé, produiraient ainsi une stationnarité de ces agrégats, mais, en migrant, ils ne satisferaient pas au critère de fixation.

Pour observer la fixation des foyers paysans, il faut donc effectuer un changement de niveau d'observation, depuis les agrégats vers celui des foyers paysans. Cela pose un problème en termes de quantité d'observables : les foyers paysans sont très nombreux (4000 dans la version 6.3, [ref chap 2, tableau 2.3](#)) et une bonne partie d'entre eux migrent. Ces migrations suivent, de plus, des modalités très différentes ([ref chap2, méca. migration](#)), rendant complexe la caractérisation des mouvements de chacun et plus encore celle d'une agrégation de ces catégories.

Pour ces raisons, la production d'indicateurs synthétiques spatiaux – une ou plusieurs cartes – ne suffirait pas à communiquer une information intelligible sur l'éventuelle fixation des foyers paysans. Il nous faut donc faire appel à des « proxys », non spatiaux, pour évaluer la fixation des foyers paysans. À cet effet, on a retenu des indicateurs relatifs aux migrations des foyers paysans et à l'explication de ces migrations : combien de foyers paysans se déplacent à chaque pas de temps (moins il y a de déplacement, plus la fixation est importante) ? Quelles sont les modalités de ces déplacements (un déplacement entre deux agrégats lointains n'a pas les mêmes conséquences en termes de stabilité qu'un déplacement minime au sein d'un même agrégat) ? Ou encore, comment évolue la satisfaction des foyers paysans, et avec celle-ci, la probabilité de se déplacer ?

Ces indicateurs permettent d'évaluer la capacité du modèle à reproduire la fixation des foyers paysans. Pour autant, la contrainte est ici double : on recherche une fixation, mais celle-ci est supposée, empiriquement, se dérouler et se voir renforcer par la mise en place du maillage paroissial qui doit servir de support à la nouvelle configuration spatiale émergente. On s'appuiera donc aussi sur des indicateurs relatifs à cet espace support constitué par les paroisses : leur nombre, leur dispersion dans l'espace et l'efficacité de la desserte qu'elles assurent.

Contrairement aux deux précédentes dimensions d'analyse, nous n'établissons ici pas de hiérarchie nette entre les indicateurs. Cette étude de la fixation est moins facilement appréhendable que celle de la polarisation ou de la hiérarchisation et les indicateurs qui la caractérisent apportent une complémentarité de points de vue plus qu'un affinement de l'évaluation de cette dynamique. Dès lors, les indicateurs présentés ci-après ne peuvent être catégorisés en indicateurs principaux et secondaires. On retrouvera cependant cette hiérarchie d'évaluation au sein des indicateurs, par exemple en suivant l'ordre des graphiques présentés. Par exemple, pour évaluer la fixation des foyers paysans, on observera d'abord le résultat produit (nombre de déplacements) avant d'entrer dans le détail de sa composition (types des déplacements).

Migrations des foyers paysans. La migration des foyers paysans est l'élément moteur de SimFeodal : c'est par le déplacement individuel de cha-

cun des foyers paysans que la configuration spatiale évolue. Les migrations affectent donc chacune des dimensions d'analyse – polarisation, hiérarchisation et fixation –, mais c'est au sein de cette dernière qu'il est le plus intéressant de les observer. Il est en effet attendu que de nombreuses migrations surviennent, afin que le système de peuplement puisse se structurer, mais pour autant, il est aussi nécessaire que ces migrations tendent à diminuer au cours du temps, une fois le système en voie de stabilisation.

Les mécanismes de SimFeodal différencient deux types de migrations ([ref chap2](#)) : les migrations locales et les migrations lointaines. Les premières font émerger, par concentration des foyers paysans dispersés dans un rayon très local, de petits agrégats ruraux. Leur nombre devrait décroître avec le temps, à mesure que les foyers paysans dispersés sont polarisés localement. Les migrations lointaines, au contraire, doivent jouer tout au long du modèle, en redistribuant les foyers paysans qui seraient déjà agrégés, en direction d'agrégats plus importants : leur nombre devrait être relativement constant.

Rappelons que différentes contraintes temporelles viennent bouleverser, à dessein, le comportement des foyers paysans. En particulier, entre 950 et 1050, les modalités d'évaluation de la satisfaction deviennent plus strictes ([Voir dans chap2, frise](#)). Cela engendre nécessairement une plus forte propension des foyers à migrer.

Si les connaissances empiriques d'un tel niveau de finesse ne sont pas disponibles, on peut tout de même avoir des attentes quant au comportement attendu du modèle. On peut ainsi chercher à ce que l'évolution des migrations suive plusieurs rythmes au cours du temps :

1. Avant 950, on attend quelques migrations lointaines, stables au cours du temps ; et de plus nombreuses migrations locales menant à la constitution de petits agrégats locaux, qui devraient diminuer au cours du temps.
2. Entre 950 et 1050, les nombreuses perturbations devraient voir une nette augmentation des migrations locales, et dans une moindre mesure lontaines, prémisses à la constitution d'agrégats plus hiérarchisés.
3. Après ces perturbations, on devrait retrouver le niveau de migration de la seconde période, et là aussi, tendre vers une diminution des migrations locales, le système se stabilisant à l'approche de la fin de la période.

Satisfaction des foyers paysans. On a vu dans les deux indicateurs précédents que les déplacements des foyers paysans sont très affectés par leur niveau de satisfaction. Pour comprendre ces déplacements, il est donc utile d'observer en détail l'évolution de la satisfaction qui les provoquent.

La satisfaction ne saurait être résumée en un simple indicateur de fixation, tant son rôle est prépondérant dans une large partie des mécanismes du modèle. Pourtant, mobilisé ici, cet indicateur apporte un éclairage différent. Il permet ainsi de préciser les indicateurs précédents en donnant une explication à leurs tendances.

Ainsi, une satisfaction globalement trop élevée ne serait pas assez motrice

à des déplacements, résultant en une polarisation faible. Au contraire, une satisfaction globalement faible engendrerait une très forte mobilité, par exemple sous forme de mouvements pendulaires, d'où une absence de fixation du peuplement. Comme pour les déplacements, on attend, depuis les connaissances empiriques, qu'il y ait trois phases dans l'évolution de cette satisfaction : (1) Avant 950, les foyers paysans devraient être globalement satisfaits, et de plus en plus à mesure qu'ils s'agrègent ; (2) entre 950 et 1050, les restrictions fortes (distance à un château, à une église paroissiale) devraient résulter en une forte diminution de satisfaction ; (3) passées les perturbations, la satisfaction devrait remonter doucement, sous l'effet de l'agrégation, de la constitution généralisées de communautés paysannes, de la construction de châteaux et de nouvelles églises paroissiales.

Nombre et dispersion des paroisses. Tout au long de la période, de nouvelles églises paroissiales sont créées (cf. mécanisme dans chap. 2) et viennent renforcer l'encadrement des foyers paysans. L'évolution du maillage constitué par les ressorts paroissiaux représente donc l'évolution de la structure spatiale des foyers paysans. Pour que les foyers paysans soient satisfaits, il faut, à partir de 950, qu'ils soient suffisamment proches d'une église paroissiale. Il est donc légitime d'observer la croissance du nombre et la répartition des paroisses telles que simulées dans le modèle SimFeodal.

Sur un plan purement numéraire, plus les paroisses seront nombreuses, mieux la population sera desservie, et moins les foyers paysans se déplaceront : la fixation sera donc plus forte à mesure que le nombre de paroisses augmente. Sur un plan spatial, l'accumulation de paroisses en zones denses (dans des agrégats de populations) doit renforcer la polarisation de ces zones, et avec elle, accroître les chances de fixation des foyers paysans.

D'après les mécanismes mis en place dans SimFeodal, on s'attend à ce que le nombre de paroisses augmente régulièrement au cours du temps, depuis un nombre initial évalué à 50 en 800, jusqu'à atteindre un objectif numérique fixé à 300 d'après les connaissances empiriques de la région modélisée. Concernant la répartition spatiale, on cherche à atteindre le double phénomène décrit dans la partie relative à la hiérarchie des paroisses (section 3.2.3.2, 132). Cela devrait mener à une diminution de la superficie des paroisses les plus larges dans les zones peu denses. Dans les zones plus denses, concentrant les agrégats, cela devrait aussi mener à une diminution de la superficie, bien plus drastique cependant, correspondant aux multiples paroisses « urbaines » qui se partagent une superficie faible. Notons que la dispersion des agrégats et des pôles, vue précédemment (3.2.3.1), constituerait ici aussi un bon indicateur de fixation, en observant non plus l'évolution de la couverture spatiale, mais plutôt la fixation et le renforcement des dynamiques locales de polarisation.

Efficacité de la desserte paroissiale. Les paroisses doivent assurer conjointement une desserte efficace et équitable du monde simulé (section 3.2.3.2). Pour évaluer l'efficacité du maillage simulé, on peut en observer la couverture spatiale. On peut ainsi quantifier la dispersion de ces paroisses en analysant leur répartition spatiale, ou plutôt, celle des églises paroissiales qui en consti-

tuent le cœur.

Pour cela, on peut faire appel à une méthode d'analyse spatiale assez classique (proche de la méthode des quadrats) en carroyant l'espace et en comptant le nombre d'églises paroissiales de chacune des mailles. Un indicateur simple est alors de faire un compte des mailles contenant au moins une paroisse ce qui permettra alors d'appréhender simplement la part de l'espace couvert par des églises paroissiales.

On s'attend à ce que l'indicateur ainsi produit augmente au cours du temps, à mesure que de nouvelles églises paroissiales viennent desservir le territoire, de manière régulière (comme l'évolution du nombre d'églises paroissiales).

3.2.3.4 Évaluer SimFeodal pour en permettre le paramétrage

La mise en place de critères d'évaluation est indispensable pour un modèle. L'évaluation peut ainsi permettre de « valider » la version définitive d'un modèle, mais surtout, elle en guide la construction et l'évolution au sein du processus que nous nommerons paramétrage. En effet, c'est en évaluant le modèle après chacune des modifications apportées que l'on peut définir si ces dernières l'améliore – approchant les sorties du modèle de l'objectif – ou le détériore – en augmentant l'écart entre sorties et attentes.

La construction de SimFeodal a été entièrement guidée par ces étapes récurrentes et systématiques de paramétrage : l'approche d'évaluation visuelle a ainsi été mise au service du processus de co-construction du modèle.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous montrerons donc comment le paramétrage a rythmé et déterminé la progression du modèle vers la version présentée dans le [chapitre 2](#), en commençant par définir ce terme, peu usité, qui est construit à partir de la notion de paramètre.

3.3 Paramétrage du modèle SimFeodal

Le modèle, tel qu'il a été présenté dans le chapitre précédent, était un « état », présenté en tant que « version 6.3 », c'est-à-dire que les mécanismes, paramètres et les valeurs de ceux-ci correspondent à une étape d'un modèle amené à évoluer pour répondre aux problèmes soulevés dans la dernière partie ([Ref dernière section chap 2](#)). Cette version 6.3 implique que de nombreuses versions précédentes ont été développée, testées, puis modifiées et ajustées jusqu'à obtenir une nouvelle version plus satisfaisante du point de vue des objectifs.

L'évaluation de la « satisfaction » ressentie pour une version du modèle a été présentée dans les premières parties de ce chapitre, et nous décrivons maintenant l'étape qui suit (ou précède, dans une logique faite d'allers-retours nombreux) cette évaluation, et vise à ajuster les valeurs de paramètres du modèle et le détail des mécanismes afin d'augmenter la qualité du modèle du point de vue de l'évaluation définie.

Dans cette thèse, nous proposons l'usage du terme de « paramétrage », peu fréquent, et, à notre connaissance, forgé récemment (HIRTZEL 2015 ; TANNIER 2017), pour décrire ce processus d'« amélioration » itérative du modèle, répété systématiquement durant le cycle de vie du modèle SimFeodal. Nous nous attacherons ainsi à présenter le travail de paramétrage réalisé depuis la version 0 jusqu'à la version « finale » du modèle dont les résultats sont présentés dans le **chap6**, en passant par la version présentée dans le **chapitre 2**, chacune de ces itérations ayant abouti à une version plus adaptée aux questions des thématiciens.

Avant de préciser le sens du terme « paramétrage », il semble important de définir précisément ce qu'est un paramètre. C'est en particulier nécessaire en ce que ce terme recouvre de nombreux sens selon les champs disciplinaires qui l'emploient, mais aussi, au sein même de ceux-ci, par les différents chercheurs.

3.3.1 Les paramètres

3.3.1.1 Différents points de vue sur la définition d'un paramètre

Au plus général, le nouveau petit Robert définit un paramètre en ces mots :

- « 1. MATH. Quantité à fixer librement, maintenue constante, dont dépend une fonction de variables indépendantes, une équation ou une expression mathématique. — Variable en fonction de laquelle on exprime chacune des variables d'une équation.
- 2. FIG. et DIDACT. Élément important dont la connaissance explicite les caractéristiques essentielles de l'ensemble d'une question.
- 3. PAR EXT. Élément nécessaire pour juger, évaluer, comprendre (qqch.). »

(ROBERT, REY-DEBOVE et REY 1993, **Paramètre**)

Seule la première définition correspond, à grands traits, à ce que l'on attend ici, mais elle est très généraliste, bien que ne correspondant pas pour autant à tous les usages du terme employés dans la littérature.

En mathématiques, une définition univoque. L'acceptation mathématique d'un paramètre est sans doute celle qui souffre le moins d'ambiguïté : il s'agit des termes fixes d'une équation simple, par opposition aux variables qui en constituent les éléments qui seront amenés à évoluer. Par exemple, dans la formulation d'une fonction affine, $f(x) = ax + b$, la valeur de $f(x)$ dépend de la variable x et des paramètres fixés a et b . Quelles que soient les valeurs empruntées par x , ces paramètres demeurent constants. Dans une famille d'équations plus complexes, par exemple le modèle de croissance logistique de population²⁸, l'accroissement de population au cours du temps ($\frac{dy}{dt}$) dépend de la valeur de la variable y , population à cet instant, ainsi que de deux paramètres, α , le taux de croissance, et K , la « capacité d'accueil », c'est-à-dire un potentiel maximum de population vers laquelle tend – et ne peut donc dépasser – le système modélisé. La définition mathématique est donc assez universelle

28. $\frac{dy}{dt} = \alpha y \times (1 - \frac{y}{K})$ d'après (VERHULST 1838)

et convient à la quasi-totalité des systèmes d'équations²⁹. Il convient toutefois de noter que la différence entre variable et paramètre est une affaire de point de vue, une inversion de perspective menant à échanger les paramètres et variables, tel que décrit dans l'exemple suivant :

« For the function $f(x) = ax^2 + bx + c$, could we learn something by leaving the expression in terms of the symbols a , b , and c and seeing how $f(x)$ depends on the parameters? Maybe we could fix $x = 2$ and look how $f(2)$ changes as we let a vary.

If we do such manipulations and look at how the output of a function depends on varying a parameter, then we are treating the function as though the parameter were a input variable. But that's OK, as the difference between variables and parameters is really just a matter of perspective. »

(NYKAMP 2015a)

On peut donc en retenir qu'en mathématiques, ce qui différencie la variable du paramètre est l'aspect fixe de ce dernier, au moins pendant la durée d'exécution d'une fonction :

« A parameter is a quantity that influences the output or behavior of a mathematical object but is viewed as being held constant. [...] Variables are viewed as changing while parameters typically either don't change or change more slowly. »

(NYKAMP 2015b)

On propose donc une définition sans doute plus spécifique que celle du nouveau petit Robert, mais aussi plus tournée vers l'usage : un paramètre est une variable maintenue constante durant l'ensemble de l'utilisation d'une fonction.

Une vision duale en statistiques. En statistiques, quand bien même cette discipline fait un large usage des formalismes mathématiques, les paramètres recouvrent un ensemble assez différent : il s'agit d'une « grandeur mesurable qui permet de présenter de façon plus simple, plus abrégée les caractéristiques essentielles d'un ensemble statistique » (IMBS et QUEMADA 1992, Paramètre, STAT. (calcul des probabilités)).

« In statistics, the most common use of « parameter » is for a characteristic of a population, or of a distribution of scores, described by a statistic such as a mean or a standard deviation. For example, the mean (average) score of on the midterm exam in Psychology 201 is a parameter. It describes the population composed of all those who took the exam. »

(VOGT 1993, p. 164)

Ainsi, pour les statisticiens, la moyenne, l'écart-type ou encore le coefficient d'asymétrie sont des paramètres, que l'on symbolise alors au moyen de lettres grecques (VOGT 1993, ibid.). On peut toutefois y retrouver une logique commune avec les paramètres mathématiques quand on décrit une loi statistique

29. À l'exclusion notable des systèmes d'équation paramétriques, où, à l'inverse, le terme de paramètre désigne alors les variables indépendantes.

avec ces valeurs, qui deviennent alors les éléments permettant de caractériser une variable. Ainsi, pour décrire les caractéristiques de la distribution théorique – normale – d'une variable X , on fera appel aux paramètres théoriques de cette loi que sont l'espérance³⁰ (μ) et l'écart-type (σ^2) : $X \hookrightarrow \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$.

Une absence de consensus en informatique. Dans le domaine informatique, la définition est bien plus floue et inclusive que dans les champs décrits auparavant, sans doute en raison d'une hétérogénéité bien supérieure dans les pratiques et construits informatiques. Comme dans les fonctions mathématiques, les paramètres sont les arguments des fonctions informatiques. Ces fonctions recouvrent toutefois un ensemble extrêmement vaste, bien plus hétérogène que dans les domaines mentionnés ci-dessus. On parle ainsi de fonction³¹ pour toute suite d'instructions informatiques ayant pour vocation – ou pour capacité – à être répétée, ré-exécutée. Ces fonctions appliquent ainsi, le plus fréquemment, cette suite d'instruction sur des données en entrée, et produisent ainsi des données en sortie, résultantes du traitement effectué sur les entrées³². Certaines fonctions sont donc très simples, et peuvent s'apparenter à des fonctions mathématiques, telles que par exemple la fonction arrondi (round() dans sa version la plus courante). Cette dernière prend en entrée un nombre décimal, et retourne un nombre entier. Le nombre décimal passé en entrée est alors nommé paramètre. Notons que cette fonction accepte le plus souvent un second paramètre, sous forme d'un nombre entier, qui permet de définir le nombre de décimales (*digits*) que l'on souhaite conserver. Par exemple, l'arrondi de 2,551 à une décimale renverra la valeur 2,6. Il est important de noter qu'en informatique, les paramètres ont souvent une « valeur par défaut », c'est-à-dire une valeur qui sera utilisée si le paramètre n'est pas explicitement spécifié. Dans le cas de la fonction arrondi, si le premier paramètre n'a pas de valeur par défaut, ce qui n'aurait aucun sens, le second paramètre est souvent proposé avec une valeur par défaut de 0. Si on ne la précise pas, le nombre renvoyé par la fonction sera ainsi un entier, soit 3 dans le cas précédent : round(2.551) = 3, mais round(2.551, digits = 1) = 2,6.

Ce premier exemple est quasiment en tout point assimilable à l'acceptation mathématique d'une fonction, et dès lors, ses paramètres ressemblent fortement à ceux que ce domaine définit, à l'exception que le premier paramètre de la fonction arrondi serait défini comme une variable en mathématiques. Pour

30. Il s'agit de la moyenne théorique. On réserve ainsi le terme de moyenne à une valeur calculée depuis des valeurs empiriques.

31. On utilisera aussi indistinctement les termes de procédure, de (sub)routine ou encore de méthode. Notons que chacun de ces mots a normalement un sens précis. Par exemple, une méthode désigne une fonction qui peut être exécutée par une instance de classe en programmation orientée objet. Certaines définitions plus précises sont toutefois souvent utilisé à mauvais escient, provoquant alors des inversions de sens. Ainsi, une procédure est le plus souvent décrit comme une suite d'instructions ne retournant pas de valeur, au contraire d'une fonction. Mais, par exemple dans le langage SAS (INSTITUTE 1990), toute fonction est nommée procédure, à l'instar de la moyenne par exemple (PROC MEANS).

32. Notons que certaines fonctions produisent des « effets de bord », c'est-à-dire ne renvoient pas de données en sortie, mais effectuent une action à partir des données en entrée. La fonction imprimer par exemple, ne renvoie aucune sortie informatique, ce sont ses effets de bord qui déclenchent l'impression d'un document.

autant, l'informatique fait usage de nombreuses fonctions bien moins comparables, car formulées de manière algorithmique et non mathématique.

Prenons l'exemple d'une fonction simple de conversion d'image, permettant par exemple de convertir une image du format JPEG au format PDF. Cette fonction, que l'on nommera `convert`³³, requiert au moins deux « paramètres » : l'emplacement informatique (le « chemin », ou *path*) du fichier image (JPEG) d'origine, et le chemin du PDF en sortie. Il ne s'agit plus dès lors de paramètres numériques comme en mathématiques ou en statistiques, mais d'éléments nécessaires à une fonction pour être exécutée. De plus, cette fonction accepte aussi d'autres « paramètres », permettant entre autre de redimensionner l'image pendant cette conversion, d'en modifier la résolution, ou encore d'en transformer les couleurs, par exemple en la convertissant en nuances de gris. Ces paramètres, facultatifs, agissent alors comme autant de nouvelles fonctions. Ils ne servent plus uniquement à « paramétriser » le but premier de la fonction de conversion, mais en fait à y ajouter des fonctionnalités, des mécanismes de transformation de l'image source.

On ne peut donc plus véritablement parler de variables qui seraient affectées ou transformées par des valeurs statiques de paramètres. On utilisera donc, dans ce contexte, davantage le terme de paramètre d'entrée ou encore d'argument dans ce cas. Notons qu'en anglais, la différence entre *parameter* et *argument* est plus formalisée qu'en français : ils se définissent par le lieu de leur utilisation. Lors de la définition d'une fonction, on fait appel à des paramètres qui seront utilisés au sein de la fonction. Lors de l'utilisation de cette fonction, l'utilisateur fournira des arguments, dont les valeurs seront alors utilisés en remplacement des paramètres dans la fonction.

« The terms parameter and argument are sometimes used interchangeably, and the context is used to distinguish the meaning. The term parameter (sometimes called formal parameter) is often used to refer to the variable as found in the function definition, while argument (sometimes called actual parameter) refers to the actual input passed. For example, if one defines a function as `def f(x) : ...`, then *x* is the parameter, while if it [is] called by `a = ... ; f(a)` then *a* is the argument. »

(*Parameter (Computer Programming)* 2017)

Il apparaît donc que si les définitions mathématiques et statistiques d'un paramètre sont assez largement précises et explicites, il en est tout autre dans le champs disciplinaire informatique. Peut-être parce que ce champ est composé de bien plus de praticiens (les développeurs) que de chercheurs, on constate que les termes de variables, de paramètres, d'arguments ou encore d'entrées (*inputs*) y sont assez régulièrement intervertis. Afin de préciser l'emploi que nous ferons de ces termes dans le cadre de la modélisation à base d'agents présentée dans le chapitre précédent, il convient donc de s'intéresser plus spé-

33. Cette fonction est disponible dans le logiciel ImageMagick (IMAGEMAGICK STUDIO 2008).

cifiquement aux usages de ces termes dans le domaine de la simulation informatique en sciences humaines.

3.3.1.2 Les paramètres dans les modèles agents

L'approche classique. Un premier point est à noter : nous n'avons trouvé que très peu de définitions spécifiques de ce qu'est un paramètre dans le champ de la simulation à base d'agents. C'est pourtant un terme employé dans la quasi-totalité de la littérature existante. Cela ne relèverait que d'un problème de jargon non explicité s'il y avait consensus que le sens donné à ce mot, mais au contraire, les acceptations, qui doivent être comprises par le contexte en l'absence de définitions formelles, varient fortement selon les auteurs. Par exemple, la définition que l'on peut extraire de l'un des manuels de référence en modélisation agent (TREUIL, DROGOUL et ZUCKER 2008) s'éloigne fortement de ce que l'on a pu décrire ci-dessus :

« Un modèle dynamique renferme en effet deux composants distincts : une représentation de la structure du système de référence (exprimée dans le langage du méta-modèle), et une représentation des lois régissant sa dynamique. Ces deux représentations sont habituellement pourvues de données ou d'éléments d'information souvent numériques (le minimum pour un modèle dynamique étant d'être pourvu d'un élément représentant le temps) appelés **paramètres**. La « perturbation » d'un modèle par simulation va donc signifier la modification contrôlée de la valeur de certains de ces paramètres, que l'on appellera **entrées** du modèle. Inversement, ce que l'on pourra mesurer dans une simulation sera décrit sous la forme d'autres paramètres qui seront appelé **sorties**.

Les *entrées* d'un modèle dynamique sont des paramètres dont la valeur est définie en dehors du modèle et qui représentent ce que le simulateur peut perturber. Les *sorties* d'un modèle dynamique sont également des paramètres qui expriment ce que l'on cherche à mesurer en réponse à ces perturbations. »

(TREUIL, DROGOUL et ZUCKER 2008, p. 8)

Nous trouvons plusieurs problèmes à cette définition. En premier lieu, l'acceptation très globale de ce qu'est un paramètre rappelle celle d'une variable en informatique. Il semble s'agir d'une vision plus orientée techniquement que conceptuellement. Ainsi, définir le temps — ou la variable informatique permettant de le mesurer — comme un paramètre nous semble bien trop à contrecourant des définitions de paramètres issues des autres champs scientifiques. De plus, le fait que les sorties d'un modèle soient considérées comme des paramètres est en opposition avec l'ensemble de l'usage courant de ce terme, y compris dans le domaine spécifique de la modélisation agent. Nous ne pouvons donc souscrire à cette définition, ni à la vision qu'elle dépeint de ce qu'est un paramètre.

Dans le présent ouvrage, nous donnerons donc à ces termes des sens différents, voire opposés, qui nous semblent plus fréquents dans le champ de la modélisation en sciences humaines et se retrouvent partiellement dans le

schéma de Balci (figure 3.8).

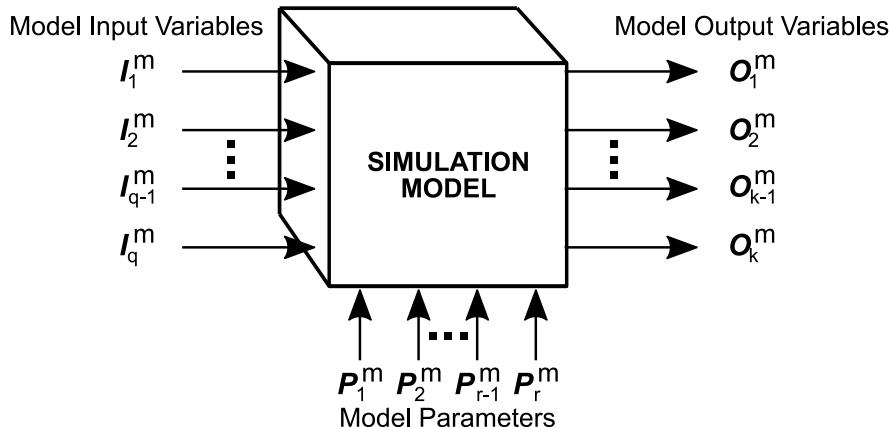


FIGURE 3.8 – Les variables d'un modèle de simulation, adapté depuis BALCI (1994, p. 122).

N.B : ce schéma est tronqué, ne présentant que la partie « modèle de simulation » alors que celle-ci est mise en miroir à une partie « système » représentant l'empirique.

Dans ce schéma et l'article associé, et bien qu'il n'en définisse nulle part explicitement le sens, BALCI esquisse la composition d'un modèle de simulation. Le modèle est alimenté par des variables en entrée (*Model Input Variables*), qui sont globalement affectées par des paramètres (*Model Parameters*). Après passage dans la « boîte noire » que représente ici le modèle de simulation (*m*), cela aboutit sur des variables de sortie (*Model Output Variables*).

Notons que si l'auteur du schéma symbolise les entrées, paramètres et sorties au moyen de quatre flèches à chaque fois, leur nombre est variable et sans correspondance. Il y a ainsi q variables en entrée, r paramètres et k variables en sortie. Ces nombres différents représentent bien qu'il n'y a pas de lien direct entre les variables en entrée et celles en sortie : la variable en entrée I_1^m et la variable en sortie O_1^m ne correspondent pas nécessairement. De même, BALCI n'indique pas de lien entre les paramètres et les variables (en entrée ou en sortie) : les paramètres agissent à l'échelle du modèle de simulation, sans détail des éléments affectés.

Paramètres, variables, indicateurs : un essai de définition graphique. Dans ce travail de thèse, nous rendons compte de la construction d'un modèle complexe, doté de très nombreux paramètres, variables d'entrée et variables de sortie (selon la définition de BALCI). Nous avons donc préféré développer notre propre « ontologie » de ces termes, qui nous semble plus adapté à la description d'un modèle tel que SimFeodal.

Comme chez BALCI, notre ontologie est organisée autour d'une opposition entre des **entrées** et des **sorties**.

Les entrées. La figure 3.9 représente notre proposition de définition des entrées, utilisée dans ce travail de thèse. Les entrées sont donc composées de deux types d'éléments, des variables et des paramètres. Les **variables** (V_n) sont des variables informatiques dont la valeur évolue tout au long de la simulation. Le nombre d'agrégats, par exemple, est une variable : une valeur est assignée

à l'initialisation du modèle, et cette valeur est ensuite susceptible de changer à chaque pas de temps.

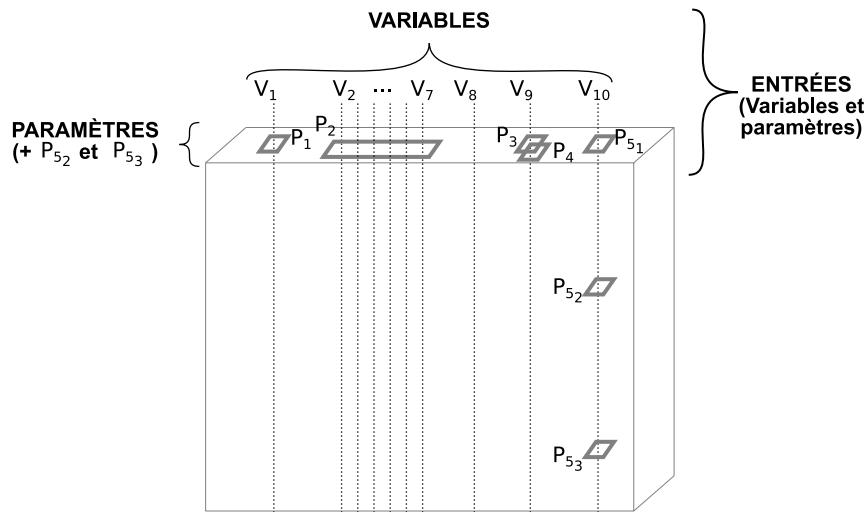


FIGURE 3.9 – Les entrées : variables et paramètres.

Ces variables sont potentiellement affectées par des **paramètres** (P_n), qui peuvent avoir des effets directs sur une unique variable (P_1 , qui pourrait par exemple représenter le paramètre régulant le nombre d'agrégats à l'initialisation), ou sur plusieurs variables (P_2 , nombre de foyers paysans par agrégat initial par exemple). Plusieurs paramètres peuvent aussi affecter la même variable : dans la figure, la variable V_9 est affectée conjointement par les paramètres P_3 et P_4 . On peut illustrer ce type de cas avec l'exemple du nombre de foyers paysans, qui évoluera en fonction d'une part d'un paramètre définissant la population initiale et d'autre part en fonction d'un second paramètre définissant le taux de croissance. Le dernier type de paramètre (P_5), assez fréquent dans SimFeodal, correspond aux paramètres dont les valeurs peuvent changer au cours de la simulation. Par exemple, le besoin de protection des foyers paysans évolue au cours du temps simulé, et le paramètre correspondant aura donc plusieurs valeurs décrivant les différentes dates où appliquer le changement (P_{51} , P_{52} , P_{53}), et les modalités que prendra alors la variable V_{10} .

Les sorties. À l'autre bout du modèle, dans la figure 3.10, on retrouve encore les variables (V_n), mais certaines sont extraites du modèle sous forme d'**indicateurs de sortie**.

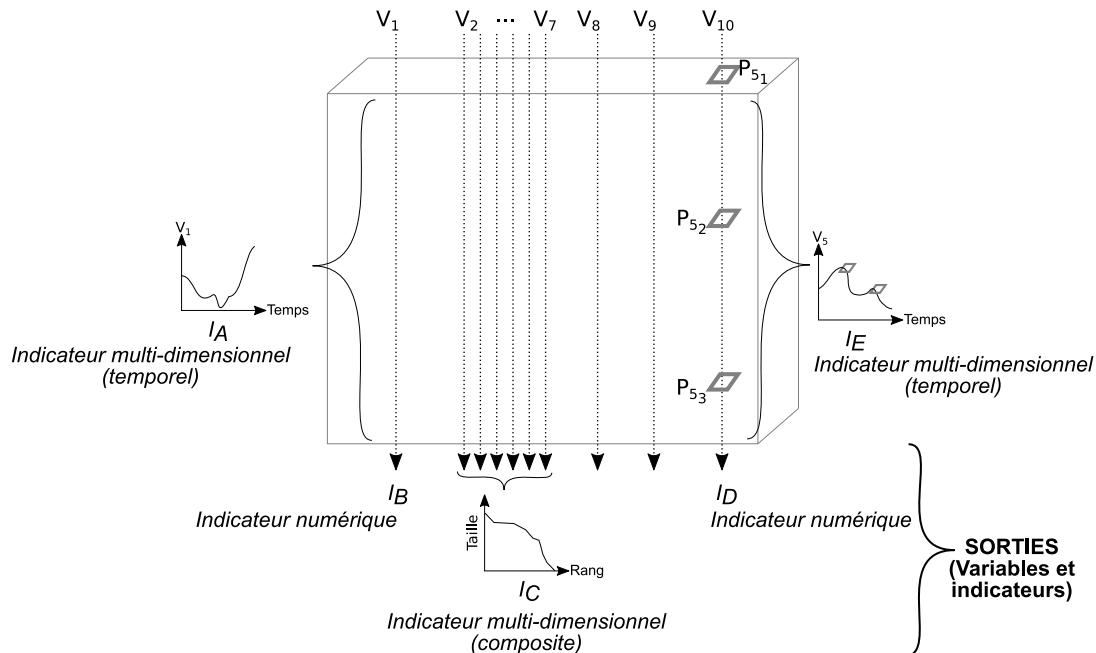


FIGURE 3.10 – Les sorties : variables et indicateurs.

Parmi ces indicateurs de sortie, on identifie là aussi plusieurs types. Certains indicateurs (I_B et I_D) correspondent directement aux valeurs des variables correspondantes (V_1 et V_{10} respectivement) en fin de simulation. Ces indicateurs sont donc d'une forme numérique (cf. figure 3.7) simple, et renseignent par exemple sur le nombre de foyers paysans ou d'agrégats de population en fin de simulation. D'autres indicateurs sont dits « multi-dimensionnels » (figure 3.7) : ils correspondent soit à la combinaison de plusieurs variables en fin de simulation (indicateur « composite », I_C , qui peut par exemple représenter la courbe rang-taille issue des variables V_2 à V_7 qui seraient alors les populations des agrégats), soit à l'évolution temporelle d'une variable (I_A et I_E). Ce sont dans ce cas des indicateurs de sortie multi-dimensionnels temporels, et ceux-ci sont très fortement mobilisés dans l'évaluation de SimFeodal : évolution du nombre d'agrégats, du taux de concentration des foyers paysans, etc.

Notons que si toutes les variables, par définition, varient au cours de la simulation, toutes ne sont pas utilisées pour former des indicateurs de sortie (V_8 et V_9 dans la figure). Elles ne sont pas « inutiles » pour autant, parce qu'elles peuvent influencer/interagir avec d'autres variables par le biais des mécanismes des agents. Leur variation aura alors une influence sur d'autres variables, et donc potentiellement sur différents indicateurs de sortie.

Dans la figure 3.10, l'indicateur de sortie I_E , de type multi-dimensionnel et temporel, permet de garder à l'esprit que le lien entre variable et paramètre peut être étroit : la variable V_{10} , dont la valeur finale est extraite dans l'indicateur I_E , ne peut être étudiée dans son évolution (I_E) sans prendre en compte l'influence forte du paramètre évolutif P_5 . On retrouve ainsi de fortes inflexions dans l'évolution des valeurs de V_{10} au cours du temps simulé, quand les modalités P_{52} et P_{53} du paramètre P_5 changent.

Entrées et sorties du modèle. La figure 3.11 constitue une synthèse de cette « ontologie » lexicale mobilisée dans cette thèse. Un modèle de simulation comme SimFeodal contient donc en **entrée des variables**, dont la valeur peut changer au cours du déroulement d'une simulation. Ces variables peuvent être initialisées ou affectées par des **paramètres**, qui agissent conjointement et selon des modalités qui peuvent varier au cours du temps. En fin de simulation, on récupère des **sorties**, sous la forme d'**indicateurs de sortie** qui correspondent aux valeurs finales des **variables**, à leur combinaison, ou encore à leur évolution, temporelle, au cours de la simulation.

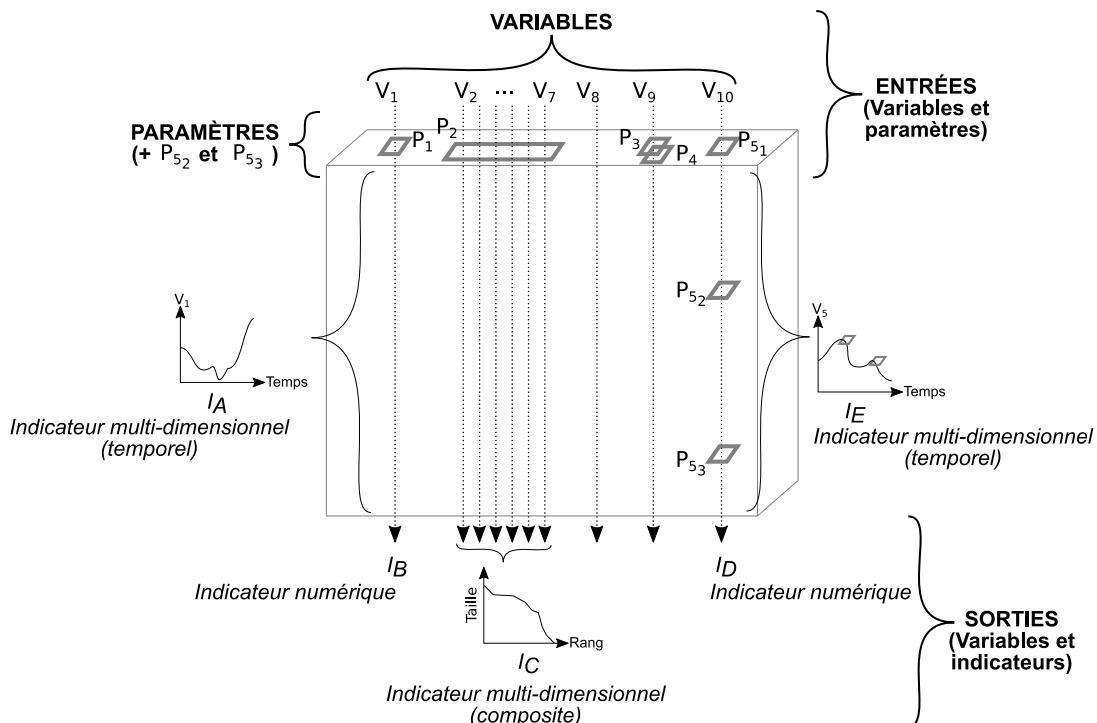


FIGURE 3.11 – Organisation des entrées et sorties du modèle.

Paramètres et expériences. Les paramètres ont des valeurs pré-définies, par définition, pour l'exécution d'une simulation ou de ses réplications (dans lesquelles les valeurs des paramètres sont volontairement identiques). Quand bien même leurs modalités peuvent évoluer (P_{51} , P_{52} ou P_{53}) au cours du temps simulé, c'est un choix effectué avant la simulation et les valeurs et dates d'applications de ces valeurs n'évolueront pas.

Les valeurs des paramètres sont toutefois amenées à évoluer, non pas au sein des simulations, mais au sein d'expériences (figure 3.12), dont le but est justement de faire varier ces paramètres pour en comparer les effets. Les paramètres variant (P_2 , P'_2 ou P''_2 par exemple), il est ainsi attendu que les variables de chacune de ces expériences soit affectées différemment, et débouchent ainsi sur la production d'indicateurs de sortie qui montreront des variations entre les expériences.

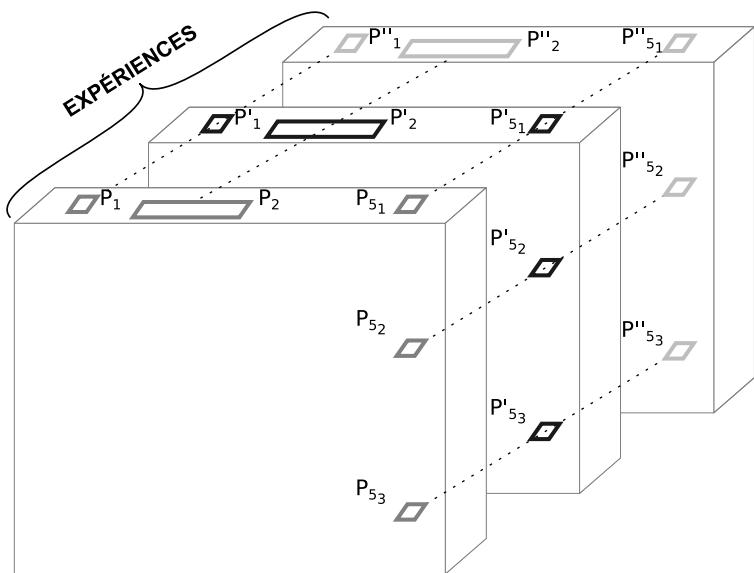


FIGURE 3.12 – Variation des paramètres entre les expériences.

3.3.1.3 Les paramètres dans SimFeodal

Les paramètres sont donc un sous-ensemble des entrées d'un modèle qui ont vocation à varier dans les différentes exécutions de ce modèle. Pour autant, c'est un sous-ensemble assez divers, et tous les paramètres n'apportent pas les mêmes connaissances, que ce soit par leur valeur ou par la manière dont ils varient. Il convient donc d'identifier différents types de paramètres, non selon leur caractéristique propre (c'est-à-dire leurs propriétés, qui permettent de les différencier des sorties par exemple), mais selon leur usage et donc la manière dont on pourra les mobiliser. À ce titre, la littérature en sciences humaines et sociales distingue souvent deux types de paramètres. D'un côté, des paramètres empiriques, dont la valeur a une correspondance directe dans le domaine empirique (on peut donc l'observer), et d'un autre, les paramètres techniques³⁴, pour lesquels cette correspondance n'existe pas. Comme dans la plupart des typologies ayant trait à la catégorisation de valeurs numériques, de nombreux paramètres peuvent se trouver à l'interface de ces deux classes. Comme les paramètres de SimFeodal sont nombreux (voir l'annexe N, tableau de tous les paramètres) et seraient trop sommairement distingués dans ces deux catégories, nous avons choisi de mobiliser une typologie en quatre classes (voir encadré 3.3), relatives au sens de ces paramètres vis-à-vis du fonctionnement du modèle. Cette typologie est mixte, entre d'une part le degré de connaissance empirique sur lesquels les paramètres reposent (paramètres techniques *vs* les autres), et d'autre part l'usage qui en est fait dans le modèle (*input* et contexte *vs* les autres). Cette typologie est notamment appuyée sur celle de TANNIER (2017, p. 45).

34. MATHIAN et TANNIER (2015) utilisent le terme de paramètre mécanique pour définir ce type de paramètres. Nous trouvons l'usage du mot « technique » plus approprié, en ce qu'il se différencie plus de l'empirique sur le plan de l'usage qui en est fait et que le terme de « mécanique » peut rappeler celui des mécanismes, alors même que les paramètres, empiriques ou non, ont une implication pour les mécanismes.

Encadré 3.3 : Quatre types de paramètres

Dans SimFeodal, nous avons choisi de différencier les paramètres en quatre « types », qui distinguent l’usage qui est fait de chacun de ces paramètres dans le modèle, en particulier vis-à-vis des connaissances expertes sur lesquelles ils reposent ou non.

Paramètres d’input. Ce sont les paramètres qui définissent l’état du monde simulé lors de son initialisation. Ils sont fortement basés sur les connaissances empiriques, liés à la région qui est modélisée (la Touraine). À ce titre, ces paramètres d’*input* ne sont donc pas amenés à varier en dehors d’application du modèle à d’autres cas d’étude, ou si de nouvelles connaissances empiriques viennent les modifier.

Exemples : nombre de seigneurs, de villages, d’églises, etc. à l’initialisation, dimensions du monde modélisé...

Paramètres de contexte. Les paramètres de contexte ont un ancrage empirique moins appuyé, mais agissent de manière globale et continue sur le contexte de déroulement du modèle. Ce sont les paramètres sur lesquels on peut s’appuyer majoritairement pour l’exploration des hypothèses thématiques du modèle. Leurs variations entre des expériences différentes est nécessairement guidée par l’empirie.

Exemples : taux de croissance démographique, puissance des communautés, période de construction des châteaux...

Paramètres de mécanisme. Ces paramètres ont une assise empirique plus incertaine, s’appuyant plus sur des ordres de grandeur que les précédents. Ils agissent au niveau des mécanismes des agents, et peuvent varier, tout en restant dans les mêmes ordres de grandeur, lors du paramétrage du modèle.

Exemples : seuils de distances aux églises et châteaux pour les foyers paysans, probabilité de dons de zones de prélèvement et de châteaux pour les seigneurs, attractivité relative des attracteurs qui composent les pôles...

Paramètres techniques Il s’agit des paramètres dont les valeurs, ou même les ordres de grandeur, ne s’inscrivent sur aucune connaissance empirique. Ces paramètres ont pour raison d’être de permettre à d’autres types de paramètres de s’exprimer en valeurs compréhensibles et exploitables. Dès lors, leurs valeurs sont propres à chaque version, sous-version ou expérience du modèle formalisé, et une comparaison de ces valeurs entre les différents modèles n’apporte pas de connaissance. Ils sont amenés à varier d’une manière uniquement guidée par l’évaluation du modèle lors du paramétrage, sans que cela n’ait le moindre ancrage ou répercussion empirique.

Exemples : distance de fusion entre les agrégats, pondération de la satisfaction matérielle des foyers paysans en fonction du nombre de droits acquittés, montants récupérés par les seigneurs selon les types de droits...

Avec cette typologie des paramètres basées non sur la nature de ceux-ci mais sur leur utilisation dans le modèle, nous nous inscrivons dans une vision

fonctionnaliste et donc très subjective, rappelant la définition d'un modèle de MINSKY (cf. chapitre 1). Selon l'usage que l'on fait du modèle, un même paramètre pourra donc être vu comme un paramètre de contexte ou de mécanisme (par exemple selon l'état des connaissances empiriques liées à ce paramètre sur le cas d'étude traité).

Comment choisir les valeurs de paramètres ? Après avoir présenté notre définition des paramètres, nous pouvons désormais revenir sur le processus qui les mobilise et a demandé cette explicitation : le paramétrage.

Cette étape, que nous allons maintenant définir et illustrer, consiste ainsi notamment à « ajuster » les valeurs des paramètres, ou plus exactement de certains des paramètres, en se basant notamment sur la typologie mise en place dans ces pages (paramètres *d'input*, de contexte, de mécanisme, techniques).

3.3.2 Le paramétrage

Le paramétrage d'un modèle est souvent réduit à l'un de ses aspects, le « calibrage », étape finale de la construction d'un modèle qui cherchera à reproduire autant que possible des données empirique en faisant varier les valeurs des paramètres jusqu'à ce qu'une combinaison de celles-ci soit satisfaisante.

De nombreux auteurs ont montré que le paramétrage d'un modèle ne pouvait se réduire à cette étape, chacun employant des termes différents pour désigner le processus de paramétrage, processus le plus souvent inscrit comme l'une des composantes de l'évaluation des modèles (chez NGO et SEE (2012), cf. figure 3.3 par exemple).

Le plus souvent, une fois le modèle construit, le modélisateur s'attache à son « calibrage », en cherchant pour chaque paramètre la ou les valeurs qui permettront au modèle de s'approcher, au plus près, des données empiriques devant être reproduites, c'est-à-dire la conjugaison de « valeurs optimales » de paramètres minimisant l'écart entre les données simulées et les données empiriques de contrôle. Cette étape, que l'on nomme aussi souvent calibration par anglicisme, peut se faire de manière manuelle, par approximations successives – CROOKS et al. (2019, p. 253) nomme cela « calibration qualitative » –, par semi-automatisme, par exemple en effectuant des analyses de sensibilité – THIELE, KURTH et GRIMM (2014, §2.3–2.4) mobilisent ainsi l'analyse de sensibilité, via échantillonnage, pour faire de l'estimation de paramètres –, ou encore de manière entièrement automatique – par exemple, pour HEPPENSTALL, EVANS et BIRKIN (2007) ou NGO et SEE (2012, p. 188), en suivant une méthode d'optimisation à base d'« algorithmes génétiques ».

Dans notre travail, nous souhaitons revenir sur cette approche de la modélisation, ancrant le paramétrage comme étape ultime de la construction d'un modèle, en particulier en ce que nous considérons que cette pratique de recherches de valeurs optimales est un exercice qui devrait s'effectuer tout au long de la construction du modèle, de manière plus itérative que conclusive.

3.3.2.1 Définition

Le terme de paramétrage recouvre deux sens différents, dont la distinction peut se faire selon qu'on l'utilise pour définir un processus ou pour caractériser une configuration. Ici, nous emploierons plutôt le premier cas, définissant dès lors le paramétrage comme le processus, manuel ou automatique, visant à constituer cette configuration de paramètres. Dans ce deuxième cas, le paramétrage désigne un ensemble de valeurs de paramètres, par exemple quand on mentionne un paramétrage par défaut, ou un paramétrage optimal. Pour ne pas risquer de contre-sens, nous préférerons le terme de configuration de paramètres ou de « jeu de valeurs de paramètres ».

On tend à distinguer le paramétrage – passage obligé ne nécessitant pas d'être évoqué – du calibrage, processus systématique qui inscrirait le modèle comme un outil scientifique et incontestable. Nous choisissons ici de confondre ces approches, non pas en considérant le paramétrage comme un outil d'évaluation du modèle, mais comme une composante inhérente à la construction d'un modèle, quelles que soient les formes et les temporalités que le paramétrage adopte. Le paramétrage est en effet une pratique utile dans la construction du modèle, car les résultats auxquels il aboutit, c'est-à-dire les valeurs de paramètres qui semblent mieux adaptés, renseignent aussi bien sur les biais des mécanismes adoptés que sur leur efficacité réelle. Par exemple, quand, après avoir ajouté un mécanisme, on se rend compte que des variations dans les valeurs de paramètres ne changent pas réellement les sorties du modèle, cela peut être l'occasion de repenser le mécanisme dans son ensemble, ou plus souvent, la manière dont le paramètre est mobilisé dans ce mécanisme. On retrouve cette logique dans l'exploration par Clara Schmitt du modèle SimpopLocal (SCHMITT 2014), qui a permis de réaliser que la variation de l'un des paramètres (*InnovationLife*) n'avait que peu d'impact sur les sorties du modèle, tout en rendant son calibrage plus complexe et instable :

« Au-dessous du seuil des 150 pas de simulation pour le paramétrage de InnovationLife, le calibrage du modèle est très difficile voire impossible. Au-dessus de ce seuil, le mécanisme associé au paramètre InnovationLife n'a plus d'effet sur le calibrage du modèle. Dans un souci de parcimonie du nombre et de la complexité des mécanismes simulés dans le modèle SimpopLocal, il est justifiable de retirer du modèle ce mécanisme qui n'est pas nécessaire à la simulation de la dynamique de croissance recherchée. »

SCHMITT (2014, p. 224)

Dans ce travail de thèse, nous reprenons ainsi le sens du terme paramétrage tel qu'initialement employé par HIRTZEL (2015)³⁵ et ensuite explicité

35. « La notion de paramétrage d'un modèle est souvent associée à celle de calibrage, et ces deux notions, bien que différentes, sont parfois confondues dans la littérature (Richiardi et al., 2006). Le calibrage consiste à tester plusieurs jeux de paramètres possibles pour une variable et à choisir l'un d'eux pour l'exécution des simulations, selon sa capacité à atteindre les objectifs définis. Il constitue ainsi une étape du paramétrage d'un modèle. Cette étape n'est pas forcément indispensable : si les valeurs initialement affectées permettent d'atteindre les objectifs du modélisateur, celui-ci n'a pas besoin de procéder à un calibrage. » (HIRTZEL 2015, p. 136).

par TANNIER (2017) :

« Le paramétrage d'un modèle consiste à fixer les valeurs des variables et paramètres de mécanisme, au moyen d'analyses spatiales ou statistiques de données empiriques, de transcriptions de dires d'experts, ou de simulations avec le modèle. Le paramétrage comprend une phase d'estimation (statistique ou autre) des valeurs des paramètres et variables, et une phase de calibrage si celle-ci est nécessaire. »

TANNIER (2017, p. 52)

Nous ajoutons à cette définition une composante d'implémentation, quand celle-ci est minime, qui consiste à adapter l'implémentation des mécanismes de manière à en rendre le résultat plus satisfaisant. Cela n'implique pas de changer le modèle conceptuel, et n'est pas non plus véritablement un changement dans l'implémentation du modèle. Par exemple, changer l'ordonnancement du détail d'un mécanisme relève à notre sens du paramétrage.

On peut illustrer cela avec l'exemple du mécanisme de définition du contour spatial des agrégats (cf. [méca, 2.7.2.1, chap2](#)) : un *buffer* est actuellement appliqué autour de l'enveloppe convexe formée par les foyers paysans membres d'un agrégat afin de fusionner d'éventuels agrégats très proches. On peut adapter ce mécanisme en appliquant ce *buffer* à la fin du mécanisme plutôt qu'au milieu, une fois que l'héritage des agrégats précédents a été transféré par exemple.

Cela n'aurait pas un impact important sur le plan conceptuel, ni même d'ailleurs lors de l'observation agrégée de tous les agrégats. Toutefois, au niveau local, cela peut avoir un impact non négligeable sur l'historique des agrégats. À notre sens, il s'agit d'une adaptation du modèle du même ordre qu'un changement de valeur de paramètre, et nous incluons ainsi ce type de modifications dans le processus de paramétrage.

Désambiguisation. De nombreux termes sont utilisés dans la littérature, souvent sans réelle distinction, pour désigner cette opération qui consiste à choisir un jeu de paramètres pour un modèle. Pêle-mêle, on y retrouve le paramétrage, le calibrage, l'ajustement.... Nous proposons une représentation graphique, dans la figure 3.13, de notre usage de ces termes, et en donnons des définitions dans l'encadré 3.4.

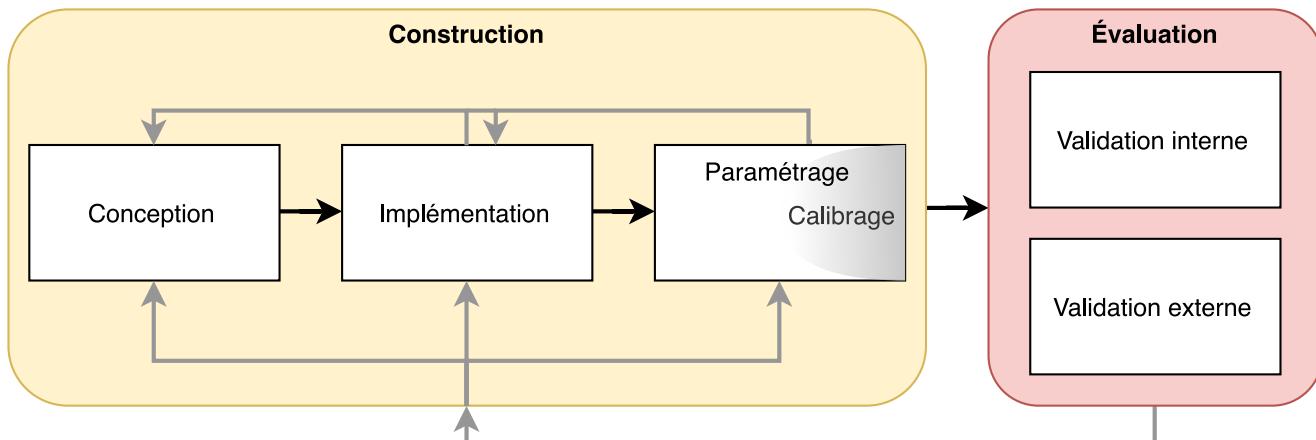


FIGURE 3.13 – Étapes du processus de modélisation.

Encadré 3.4 : Construction, paramétrage et calibrage

La figure 3.13 représente l'enchevêtrement des différentes étapes du processus de modélisation, dont nous allons brièvement détailler les parties relatives à la construction ici.

Construction. Par construction, nous définissons l'ensemble des étapes relatives à la création du modèle, c'est-à-dire la conception du modèle conceptuel, son implémentation sous forme d'un modèle de simulation et le paramétrage du modèle. À force d'allers-retours entre ses composantes, la construction aboutit sur un modèle « finalisé », qui peut être évalué de manière globalement (chacune des composantes de la construction pouvant être évaluée individuellement : l'implémentation est par exemple évaluée au moyen des méthodes de validation interne).

Paramétrage. Le paramétrage du modèle est l'étape où l'on adapte le modèle après avoir vérifié sa cohérence vis-à-vis des éléments empiriques qu'il cherche à reproduire. Lors du paramétrage, on ajuste les valeurs de paramètres, leur utilisation par les mécanismes et le détail du fonctionnement technique de ces mécanismes. On cherche par cela à obtenir un modèle plus satisfaisant du point de vue des dynamiques et résultats qu'il produit. Une des définitions du nouveau petit Robert (ROBERT, REY-DEBOVE et REY 1993) nous semble particulièrement représentative de cela :

« Paramétrier (informatique) : « Programmer (un appareil complexe), en définissant les paramètres assurant son fonctionnement optimal. Ex. *Paramétrier une imprimante* ».

Calibrage. On réserve souvent, et nous nous y tiendrons, ce terme à la dernière étape dans l'aboutissement d'un modèle. Une fois les mécanismes fixés et des objectifs définis, on peut procéder au calibrage (aussi nommé, par anglicisme, « calibration »), c'est-à-dire à une exploration de l'espace des paramètres ayant pour but de stabiliser les paramètres afin de se rapprocher autant que possible de ces objectifs. Dans cette thèse, nous inscrivons le calibrage comme une des étapes, finale, du paramétrage.

Co-construction. La co-construction, définie dans le chapitre 1, est l'approche mise en place pour réaliser chacune de ces étapes. L'approche de co-construction, dans ce travail de thèse, concerne donc aussi bien la « construction » que l'évaluation du modèle.

Notons que toutes ces étapes sont représentées de manière linéaire et chronologique, le paramétrage marquant la fin de la construction du modèle et l'évaluation la fin de l'« évolution » du modèle. Pour autant, les allers-retours entre ces étapes sont extrêmement nombreux (flèches grises), et la figure 3.13 aurait aussi pu être représentée (en perdant en simplicité) sous forme d'une spirale, voire d'une hélice, comme la « vis sans fin » d'Archimède.

3.3.2.2 Paramétrier des modèles, illustrations

Afin d'illustrer ces propos, on peut s'appuyer sur des modèles bien connus de la littérature, issus de deux champs disciplinaires différents : le modèle gravitaire (encadré 3.5) et le modèle de Schelling (encadré 3.6).

Encadré 3.5 : Paramétrage du modèle gravitaire

Description. Ce modèle, formalisé mathématiquement, , dans la formulation qu'en a faite STEWART (1948), vise à prédire des flux (F_{ij}) potentiels (démographiques, marchands, etc.) entre des lieux à partir d'une analogie avec la loi physique de la gravitation. Dans le formalisme le plus simple, « sans contrainte » (PUMAIN et SAINT-JULIEN 2001), on peut l'exprimer ainsi :

$$F_{ij} = \frac{k \times M_i \times M_j}{d_{ij}^\alpha}$$

Ce modèle présente trois ensembles de valeurs empiriques (M_i , M_j et d_{ij}), que l'on qualifierait de variables dans notre typologie, et deux paramètres (k et α). k est un paramètre technique (encadré 3.3), puisque bien que basée sur l'empirique, sa valeur – et les fluctuations de celle-ci – ne donne aucune information sur le système étudié. α est un paramètre de contexte : il est basé sur une logique empirique, et conditionne fortement le modèle (et notamment les valeurs du paramètre k). En faisant varier α , on explore des hypothèses thématiques relatives à l'importance de la distance dans les interactions entre les composantes d'un système.

À partir des valeurs empiriques M_i et M_j qui caractérisent les masses (populations, ou stocks de marchandise par exemple) des lieux i et j , et de la distance qui les sépare d_{ij} , on peut ainsi prédire F_{ij} , le flux entre ces lieux.

Objectif. Afin que ce modèle donne des ordres de grandeur réalistes quant aux quantités échangées, il faut le paramétrier en définissant une valeur de k , permettant dès lors d'obtenir un rapport entre les masses d'origine et les quantités échangées. La valeur de ce paramètre est conditionnée par celle de α , que l'on nomme fréquemment « frein de la distance », en ce qu'il permet de quantifier l'impact qu'aura un éloignement plus ou moins important sur la quantité de flux échangés.

Paramétrage. Pour « ajuster »^a le modèle, il faut donc en réaliser le paramétrage en s'appuyant sur les éléments connus de l'équation (les valeurs empiriques). α et k étant liés dans l'équation, la valeur de chacun de ces paramètres dépend de celle choisie pour l'autre, et un changement dans l'un des paramètres entraînera la nécessité de modifier l'autre.

Le paramétrage le plus simple consiste à réaliser une régression linéaire sur les logarithmes décimaux des distances et des flux observés, k prenant alors la valeur du logarithme de l'ordonnée à l'origine et α celle du coefficient directeur de la courbe. Le modèle est alors calibré (voir encadré 3.4), mais si l'on souhaite donner une valeur spécifique à l'un des paramètres, par exemple pour utiliser une valeur classique de 2 au frein de la distance (α) (PUMAIN 2004), il faudra alors le re-soumettre à paramétrage pour adapter k . De même si l'on modifie les lieux et/ou les

masses sur lesquels il s'applique.

a. C'est le terme employé par PUMAIN et SAINT-JULIEN (2001), que l'on peut ici retenir comme équivalent de paramétriser. DURAND-DASTÈS (1995, p. 298) utilise pour sa part le terme de calibration à propos du même modèle.

La manière classique de mener le paramétrage du modèle gravitaire est donc directe et déterministe. Pour une configuration donnée de masses et de distributions spatiales – impliquant les distances –, un et un seul jeu de valeurs de paramètres permet un ajustement optimal, c'est-à-dire d'assurer un écart minimal entre les valeurs empiriques et les valeurs théoriques (simulées). Le paramétrage de ce modèle se résume donc à l'étape de calibrage.

Encadré 3.6 : Paramétrage du modèle de ségrégation de Schelling

Description. Le modèle de Schelling^a est un modèle de simulation décrit par l'économiste SCHELLING (1971) qui vise à montrer comment un espace peut passer d'un état aléatoire, potentiellement intégré, à un état ségrégué ethniquement à travers une succession de comportements individuels de mobilité résidentielle. Il montre en particulier qu'on peut parvenir à un état ségrégué même quand les comportements individuels sont majoritairement tolérants à la présence d'individus d'un autre groupe. L'espace du modèle est défini comme une grille carrée composée de N^b cellules. Au début de la simulation, des agents de deux types, en proportions similaires, sont distribués aléatoirement dans l'espace du modèle. Chaque agent occupe une cellule, et le nombre total de cellules occupées (et donc d'agents) dépend d'un paramètre de densité d qui représente la part (entre 0% et 100%) du nombre de cellules qui sera occupée. Chaque agent est défini par une satisfaction, fonction du voisinage des agents. Ce voisinage correspond à la part de cellules voisines occupées par des agents « étrangers », c'est-à-dire d'un autre type : plus le voisinage contient d'étrangers, moins l'agent est satisfait. Si cette satisfaction est inférieure à un paramètre de tolérance S , qui représente un seuil à ne pas dépasser, l'agent est considéré comme insatisfait et se déplace aléatoirement dans une cellule non occupée. À terme, Schelling montre que même en considérant des valeurs de S assez élevées, c'est-à-dire un comportement plutôt tolérant, la succession de choix individuels entraîne la mise en place d'une distribution spatiale très ségrégée. On considère que le modèle a convergé quand l'ensemble des agents sont satisfaits, ce que ne permettent pas toutes les combinaisons de valeurs de paramètres.

Dans ce modèle, on peut donc identifier trois paramètres, N , S et d . N peut être vu comme un paramètre d'*input*, en ce qu'il définit une partie de la configuration spatiale, mais aussi comme un paramètre technique. Il n'y a en effet aucune correspondance entre l'espace empirique modélisé et sa représentation théorique dans le modèle de simulation. S est un paramètre de contexte : il a un ancrage empirique, certes limité, mais dont l'ordre de grandeur peut être estimé par des sociologues ou psychologues. De plus, c'est le paramètre qui conditionne thématique-

ment la convergence ou non du modèle vers un état stable. C'est donc le paramètre qui sera mobilisé pour tester les hypothèses, empiriques ou théoriques, des modélisateurs. Le dernier paramètre, d , peut être vu comme un paramètre technique puisqu'il ne s'appuie sur aucune connaissance empirique, mais aussi comme un paramètre de mécanisme : il n'a de sens que parce que le mécanisme de déplacement des agents dirige ceux-ci vers un « espace vide », et agit donc comme un paramètre de régulation de ce mécanisme. Avec un modèle conceptuel très proche, où les agents seraient capables « d'échanger » leur position plutôt que de rejoindre une cellule non occupée, ce paramètre n'aurait pas de sens.

Objectif. Le paramétrage de ce modèle consiste à fixer un N constant et à faire varier d et S afin d'en trouver des valeurs permettant la convergence vers une situation stable. Quand d est très faible (30% dans l'exemple de DAUDÉ et LANGLOIS (2006)), quelles que soient les valeurs de S , le modèle converge rapidement : quand l'espace du modèle dispose d'une faible densité d'agents, il est facile pour ceux-là de créer des agrégats homogènes distants d'agrégats de l'autre type d'agents. Quand d est plus important ($\geq 66\%$), l'espace disponible étant limité, toutes les valeurs de S ne permettent pas la convergence du modèle. Le paramétrage du modèle aura donc pour objectif de trouver la valeur maximale possible – pour un N et un d donné – que peut prendre le paramètre de tolérance S tout en laissant le modèle converger.

Paramétrage. Contrairement au modèle gravitaire, le modèle de Schelling est stochastique : les agents se déplacent aléatoirement quand non satisfaits. Dès lors, deux exécutions du modèle avec le même jeu de paramètres n'entraîneront pas forcément la même configuration spatiale. Qui plus est, pour certains jeux de paramètres, seules certaines exécutions convergeront. Le paramétrage de ce modèle ressemble donc à celui qui est réalisé pour le modèle SimFeodal. La manière « traditionnelle », c'est-à-dire manuelle, consiste à fixer un d , puis à essayer d'augmenter le S tant que le modèle converge. Si le modèle converge pour tout S , on augmente la valeur de d et on recommence à chercher la valeur maximale possible pour S . De part la nature stochastique du modèle, chaque jeu de paramètres doit être simulé plusieurs fois, le nombre de ces répliques dépendant de la part d'aléa dans le comportement du modèle. Un modèle de Schelling calibré, c'est-à-dire dont le paramétrage est achevé, donnera pour un N fixé les valeurs maximales de d et de S atteignables.

a. Une description plus poussée accompagnée d'une description de l'exploration du modèle peut être lue dans (DAUDÉ et LANGLOIS 2006)

b. Nous reprenons ici la notation $M(N, d, n, S)$ proposée par DAUDÉ et LANGLOIS (2006, p. 433) en n'explicitant toutefois pas le paramètre n décrivant le type de voisinage (4 ou 8) utilisé.

Le paramétrage du modèle de Schelling est donc très différent de celui du modèle gravitaire. Il nous semble plus représentatif de la démarche classique de paramétrage des modèles de simulation à base d'agents. Contrairement au modèle gravitaire, le paramétrage est ainsi exécuté de manière itérative et ré-

pétée : à chaque augmentation de la valeur de d , il faut ré-exécuter le calibrage du paramètre S , voire de N si on choisit de faire varier ce paramètre aussi.

À travers ces deux exemples ayant traits à des méthodes différentes, on retrouve deux approches de paramétrage que l'on souhaite ici voire confondues : dans le premier cas, le paramétrage du modèle gravitaire tend à son calibrage, à la recherche d'une solution optimale, c'est-à-dire meilleure que toute autre. Pour un phénomène donné (un jeu de données précis par exemple) et un formalisme donné (l'expression la plus simple du modèle, ici sans contrainte), seule un couple de paramètres α et k permet ainsi d'obtenir des flux modélisés proches des flux observés. Dans le cas du modèle de Schelling, il n'y a pas de recherche d'optimum : le paramétrage permet de comprendre le modèle en définissant les limites en matière de convergence. Une configuration de paramètres S et d ne sera pas meilleure qu'une autre, mais pour un S donné, on saura quelle est la valeur maximale de d permettant de parvenir, le plus souvent (en tenant compte de l'aléa) à cette convergence (et réciproquement).

3.3.2.3 Paramétriser SimFeodal

Que ou quand paramétrrer ? Ce dernier exemple montre l'importance des allers-retours entre évaluation et paramétrage, et illustre la démarche itérative et incrémentale du paramétrage. Parmi les étapes du paramétrage, le calibrage devrait ainsi être mené à chaque « version » du modèle. Ces versions, dans le modèle de Schelling, pourraient correspondre à un changement de valeur de S ou de N . Quand ces paramètres évoluent, il est ainsi nécessaire d'évaluer le modèle qui en résulte (y a-t-il convergence ?), et en fonction du résultat, de calibrer les autres paramètres de manière à obtenir une configuration optimale.

Sans aller jusqu'à voir dans ces versions successives des modèles à part entière – ce que les tenant de la modélisation modulaire (GRIMM et al. 2005) ou multi-modélisation (PUMAIN et al. 2017a) peuvent considérer –, on peut tout de même considérer que chacune de ces versions requiert des cycles de construction et d'évaluations indépendants les uns des autres (cf. figure 3.13). Chacune de ces versions devra dès lors être adaptée par un paramétrage dédié.

C'est, à notre sens, d'autant plus important que certaines versions de modèles peuvent donner lieu à des évolutions majeures, conceptuelles, méthodologiques ou techniques. Le paramétrage est dans ce cas à « re-faire » entièrement, c'est-à-dire que les étapes précédentes de paramétrages ne peuvent plus forcément aider à réduire l'amplitude des valeurs parmi lesquels fixer les paramètres par exemple.

Pour illustrer ce propos, on peut prendre l'exemple d'une modification qui a eu lieu sur SimFeodal au cours de son développement (dans la version « 0 », cf. tableau 3.1). On considérait jusque-là que pour prendre en compte la population rurale (hors Tours donc), une population de 1000 foyers paysans correspondant à une estimation probable de la situation en 800 de l'espace considéré. Lors d'une réunion, les thématiciens ont ré-évalué ce nombre, remarquant d'après d'autres connaissances expertes qu'il sous-estimait très lar-

gement la population réelle. En menant de nouvelles estimations, ils ont conclu que le nombre de foyers paysans devait finalement être fixé à 4 000, et que le paramètre dédié devait ainsi être ajusté à cette valeur.

Les autres paramètres, fixés en bonne partie empiriquement, n'avaient visiblement aucune raison d'évoluer du fait de ce changement. Les mécanismes et effets de seuil étaient en effet conçus de manière à être relatifs aux masses manipulées, et le changement attendu était une augmentation linéaire des indicateurs de sortie.

Dans les faits, cette légère modification a entraîné une obligation de repenser la quasi-totalité des autres paramètres et d'ajuster une bonne part des mécanismes, de la même manière qu'un changement de N dans le modèle de Schelling (encadré 3.6) demande de revoir d et S .

La concentration des foyers paysans était en effet bien trop rapide avec autant d'individus, et le modèle convergeait en quelques pas de temps vers une configuration presque statique et très concentrée. Tous les mécanismes de régulation de ce comportement étaient dès lors rendus ineptes, et il a fallu changer en profondeur la manière dont chaque paramètre et mécanisme interagissait avec les autres.

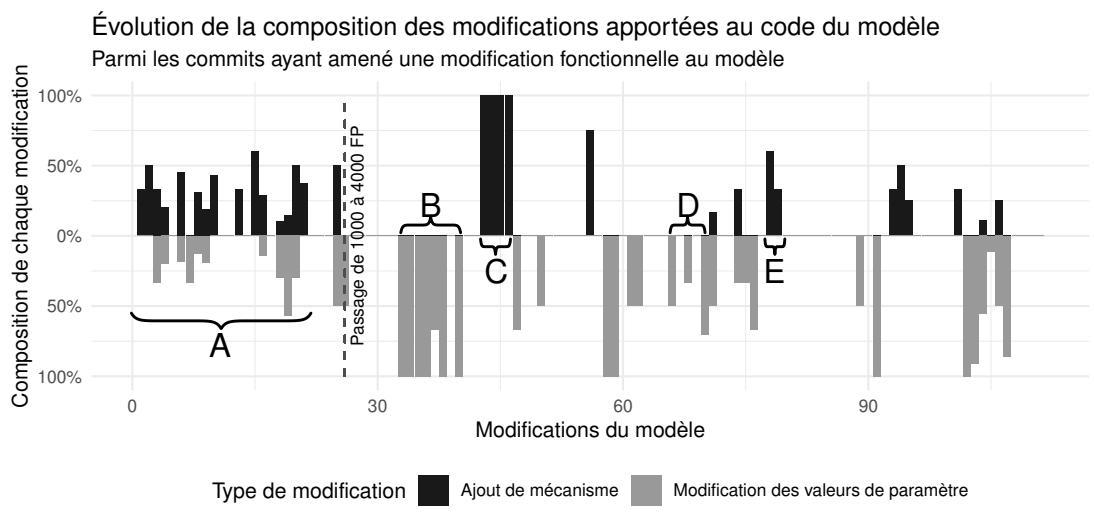


FIGURE 3.14 – Temporalité du paramétrage du modèle.

Chaque « enregistrement » (*commit*) correspond à une version modifiée et sauvegardée du modèle, contenant un ou plusieurs changements. On a ici rapporté le nombre de changements de chaque type (modification de mécanisme ou de valeur de paramètre) au nombre total de changements de chaque commit afin de figurer l'évolution des types de modification au cours de la construction du modèle.

C'est un changement majeur, que l'on peut constater dans la figure 3.14 entre les périodes « A » et « B » : le premier paramètre qui évolue est la population initiale, et on constate que de nombreuses modifications suivantes (B) portent sur l'ajustement de valeurs de paramètres. Malgré ce calibrage, on note que les résultats n'ont pas suffi et qu'il a donc fallu modifier aussi des mécanismes (période C), que ce soit au niveau du détail de leur implémentation ou au niveau conceptuel.

La première version (fin de la période A) avait été paramétré aussi correc-

tement que possible, mais ce paramétrage était entièrement à refaire avec la nouvelle version (modifications de la période B, figure 3.14).

Cet exemple renforce le caractère nécessaire du paramétrage, et qui plus est, montre que ce processus doit être mené de manière continue et répétée. Dans un modèle exploratoire comme SimFeodal (cf. chap1 ou chap2), on ne peut ainsi penser le paramétrage que sous la forme d'un calibrage qui serait l'étape ultime de construction du modèle avant validation. Si le paramétrage n'est pas régulier, alors chacune des versions et sous-versions successives ne pourra pas être évaluée de manière comparable, et on cours le risque de disqualifier une version du modèle qui aurait pu être plus plausible que les suivantes mais n'a pas été ajustée comme elle aurait pu l'être.

Quels paramètres ? Dans la partie précédente, nous avons distingué plusieurs types de paramètres (voir l'encadré 3.3 dans la section 3.3.1.3), selon leur usage dans le modèle et leur niveau d'inscription dans les connaissances empiriques. Cette distinction nous semble particulièrement utile pour dresser une hiérarchie des paramètres sur lesquels jouer pour adapter le modèle.

Les **paramètres d'input**, pour commencer, n'ont pas vocation à changer lors de l'évolution du modèle : ils ont été définis de manière empirique, et ne peuvent donc revêtir d'autres valeurs uniquement pour améliorer l'ajustement du modèle. Toutefois, si les connaissances expertes évoluent, les phases de paramétrage du modèle sont l'occasion de répercuter ces nouvelles connaissances. Les changements de ces paramètres peuvent résulter d'un besoin de préciser la mise en œuvre des connaissances empiriques³⁶, ou simplement de la correction d'approximations inexactes³⁷. Dans tous les cas, le paramétrage de ces paramètres n'est pas guidé directement par les résultats d'une version du modèle, mais par les connaissances qui y sont injectées. Il en va de même pour les **paramètres de contexte** : ils peuvent être précisés ou corrigés, mais leur paramétrage ne doit pas être guidé par l'évaluation du modèle.

Le cas des **paramètres de mécanisme** est plus emblématique du processus de paramétrage : ils reposent sur des ordres de grandeur plus incertains, et leur valeur peut donc assez librement être modifiée. Lors du paramétrage, il faut naturellement s'assurer de ne pas les faire varier en dehors des intervalles définis empiriquement, mais ils se prêtent très bien à des ajustements manuels. On peut ainsi sans crainte procéder à des modifications successives, par allers-retours entre l'évaluation des sorties du modèle et le changement de valeur de ces paramètres. On pourra de cette manière figer, temporairement – en attendant de nouveaux ajustements dus au paramétrage d'autres paramètres –, des valeurs dont l'effet combiné sera plus satisfaisant sur le déroulement et l'aboutissement des simulations.

Les **paramètres techniques**, enfin, sont les candidats les plus évidents

36. Un exemple d'un tel choix est présenté dans le chapitre 6 (partie 6.1.1.1), où l'on a choisi de faire passer les dimensions du monde simulé de 100×100 km à 80×80 km.

37. Comme c'est le cas dans l'exemple du passage de 1000 à 4000 foyers paysans présenté plus haut.

au paramétrage, et plus spécifiquement à sa composante de calibrage. Puisqu'ils ne reposent sur aucune connaissance empirique, ils constituent ainsi les « leviers » naturels sur lesquels on pourra mener le paramétrage, y compris de manière automatisée pour ces paramètres dont on peut faire varier les valeurs de plusieurs ordres de grandeur sans conséquence conceptuelle ou empirique sur le modèle. Comme dans l'exemple du paramétrage du modèle gravitaire (encadré 3.5), la modification de ces paramètres est extrêmement pratique pour compenser le paramétrage des autres types. Ainsi, si de nouvelles connaissances viennent pousser à modifier un paramètre de contexte par exemple (comme le paramètre de frein de la distance α), on peut espérer parvenir à compenser cette variation, sur les sorties, en modifiant un paramètre technique (k dans le modèle gravitaire) en conséquence.

Rappelons aussi, comme indiqué lors de la définition (section 3.3.2.1), qu'en dehors des valeurs des paramètres, le paramétrage est aussi l'occasion de modifier, d'une manière modérée, le détail de l'implémentation de certains mécanismes.

Historique de SimFeodal. Dans les paragraphes précédent, de la même manière que dans le chapitre 2, nous avons plusieurs fois mentionné les versions et sous-versions de SimFeodal. Il nous paraît important ici de les exposer (tableau 3.1) ainsi que de décrire la logique de leur distinction.

Version	Date	Nom original	Nombre de sous-versions	Nombre de commits	Changements principaux
0	21/04/2014	Base	—	168	—
2	13/04/2016	Base2	3	31	<ul style="list-style-type: none"> — Mise en place d'une hiérarchie des attracteurs — Ajout de la création de paroisses urbaines — Ajout de la différenciation entre châteaux et gros châteaux
3	28/08/2016	Base3	4	39	<ul style="list-style-type: none"> — Réduction des distances de déplacement local — Modification du mécanisme de construction de châteaux — Modification de la logique de calcul de la satisfaction matérielle — <i>N.B : C'est la version 3.3 qui est présentée dans CURA et al. (2017b)</i>
4	25/04/2017	Base4	7	59	<ul style="list-style-type: none"> — Changement de la répartition initiale des foyers paysans — Changement du mécanisme d'héritage/reconnaissance des agrégats — Changement du mécanisme de définition des pôles
5	11/06/2018	v5	4	60	<ul style="list-style-type: none"> — Modification générale de l'ordonnancement des mécanismes — Modification du mécanisme de définition des agrégats — Modification du calcul de satisfaction des foyers paysans — Mise en place de seuils évolutifs pour le déplacement local — <i>N.B : La version 4.5 présentée dans TANNIER (2017) est presque identique à la version 5.0.</i>
6	09/01/2019	v6	6 (22/09/2019)	63	<ul style="list-style-type: none"> — Renommage global et refactorisation des paramètres — Suppression des mécanismes de lignage seigneurial — Changement du mécanisme de répartition des nouveaux châteaux — Changement des calculs de probabilité de construction de châteaux — <i>N.B : Le chapitre 2 présente la version 6.3, et le chapitre 6 s'appuie sur la version 6.5.</i>

TABLEAU 3.1 – Historique des versions de SimFeodal.

À partir de la version « 2 » de SimFeodal³⁸, nous avons partiellement suivi les règles de « versionnement sémantique »³⁹, c'est-à-dire la numérotation des versions selon une logique de « VersionMajeure.SousVersion.Patch ».

On différencie ainsi des versions selon leur rétro-compatibilité, notamment au niveau de leurs sorties : entre la version 5 et la version 6 de SimFeodal, on retrouve de très nombreuses modifications du code (paramètres, mécanismes, sorties), mais le passage à la version 6 occurre quand les paramètres sont renommés et que les données en sortie de la version 6 ne sont donc plus directement organisées de la même manière que celles de la version 5.

Au sein de chaque version, on retrouve plusieurs sous-versions (appelées « versions mineures » dans le modèle de versionnement SemVer), qui apportent toutes des changements suffisants pour justifier un changement de version (évolution de plusieurs paramètres et/ou mécanismes), mais dont la compatibilité avec les versions précédentes est totale.

Au sein de ces sous-versions, on peut encore distinguer des « sous-sous-versions » (« *patches* » en SemVer), qui concernent cette fois des modifications plus restreintes. Dans l'évolution de SimFeodal par exemple, les sous-sous-versions correspondent à différents essais de changement de paramètres que nous ne sommes pas certains de conserver par la suite.

Au niveau de la granularité la plus fine enfin, chaque version, sous-version et sous-sous-version est composée de « *commits* », c'est-à-dire d'enregistrements historisés du code du modèle à un instant *t*. Ces *commits* contiennent un intitulé qui renseigne sur le contenu des modifications apportées, et surtout, ils intègrent une liste précise de ces modifications : les modifications de chaque ligne (de chaque fichier) modifiée sont ainsi conservées. Souvent, les *commits* de SimFeodal⁴⁰ sont « atomiques », c'est-à-dire qu'ils ne contiennent et ne documentent qu'un seul changement : paramètre modifié, modification d'un mécanisme, ajout d'une expérience... Cette atomicité n'est pourtant pas constante, et un *commit* peut contenir des centaines de modifications aussi bien qu'une seule.

Cette forte hétérogénéité des *commits* renforce un dernier point qui nous paraît important. L'énumération menée dans cette thèse des versions, des sous-version ou encore de tout changement du modèles, est exprimée selon un ordre chronologique, organisées au sein de la hiérarchie des versions, sous-

38. Dans le tableau 3.1, on peut remarquer que les sous-versions ne sont pas dénombrées pour la version 0. Si le code était bien historisé à l'époque, la logique de versionnement n'était pas encore véritablement à l'œuvre.

La version 0 est marquée par une forte instabilité et par de très fréquents changements. On notera d'ailleurs qu'il n'y a pas de version 1. En effet, si la version 0 est la première version « complète » du modèle, c'est-à-dire intégrant tous les agents et mécanismes identifiés pour le modèle conceptuel, c'est la version 2 qui est la première à avoir été un tant soit peu satisfaisante du point de vue de l'évaluation.

39. « *Semantic versioning* » ou « SemVer », voir <https://semver.org/>.

40. Il y en a plus de 400 à l'approche du rendu de ce travail, consultables dans le dépôt logiciel de SimFeodal :

⌚ <https://github.com/SimFeodal/SimFeodal/commits/master>

versions et patchs. Pour autant, comme indiqué dans le [chapitre 1](#), la réalité de la construction d'un modèle, qui plus est dans un contexte exploratoire et collectif, ne peut s'inscrire nettement dans cette linéarité et dans cet emboîtement de versions. Le paramétrage et la construction d'un modèle, et du nôtre en particulier, représentent en effet un travail constant d'allers-retours entre l'identification et la résolution de problèmes. Par conséquent, la structure réelle de développement, que l'on peut retrouver dans l'historique des modifications du modèle (les « *commits* »), ne correspond donc pas exactement à la chronologie organisée présentée dans le tableau 3.1. Par exemple, dans les faits, une sous-version 5.3 peut avoir précédé la sous-version 5.1. Ce qui est ici présenté résulte d'une certaine ré-organisation ou re-construction narrative de l'évolution réelle de SimFeodal.

Exploration de l'évolution d'un modèle exploratoire. Afin d'appuyer notre discours relatif à la nécessité de mener l'évaluation et le paramétrage de manière continue et systématique à l'évolution d'un modèle de simulation, il nous a semblé approprié d'illustrer ce discours autour de l'analyse de l'évolution d'un modèle de simulation. Le cas de SimFeodal, modèle exploratoire, nous semble tout à fait convenir à une telle analyse exploratoire.

Le travail de qualification de chaque modification du modèle réalisé pour la figure 3.14 étant difficilement extensible à l'ensemble des *commits* de SimFeodal (la figure en présente une centaine, à relativiser vis-à-vis des plus de 400 existants pour lesquels il aurait été nécessaire, de manière systématique, de regarder le contenu et de le catégoriser manuellement entre modifications de paramètres, de mécanismes, d'expériences, etc.), il nous a toutefois semblé intéressant d'en mener une analyse plus naïve et exploratoire.

Pour mener cette analyse, nous avons analysé de manière automatique chacun des *commits* de SimFeodal, en observant, pour chacun, le nombre de lignes de code qui avaient été modifiées. Un changement d'une ligne de code, par exemple, correspond souvent à la modification de valeur d'un paramètre, alors que la modification d'un mécanisme entraîne le changement d'une dizaine à une cinquantaine de lignes. Pour ne pas biaiser l'analyse avec les changements de la documentation du modèle, ou encore avec les fichiers relatifs à l'exécution d'expériences, nous n'avons conservé que les changements de code effectués dans les fichiers relatifs au cœur du modèle.

Le *commit* est une unité « atomique » mais pas nécessairement homogène, comme dit plus haut, et à ce titre, il arrive souvent qu'un *commit* soit suivi rapidement après d'un second, voir d'un troisième *commit* venant en corriger un tout petit aspect (faute de syntaxe dans le code, oubli de répercussion d'une modification dans les sorties...). Nous avons donc aussi agrégé ces *commits* à l'échelle de la journée, en considérant que les commits d'une même journée de travail formaient un ensemble cohérent.

On a ensuite caractérisé le contenu de ces agrégations de *commits* journaliers en mesurant la taille médiane (en nombre de lignes de code modifiées) et la somme de ces modifications pour chaque jour. La somme des modifications

étant par nature d'un ordre de grandeur bien plus élevé que la médiane⁴¹, on a normalisé (réduction sans centrage) les valeurs afin qu'elles soient comparables graphiquement. La figure 3.15 est une représentation de cette analyse⁴², qui permet de visualiser le « rythme » des changements de SimFeodal et d'en tirer quelques remarques.

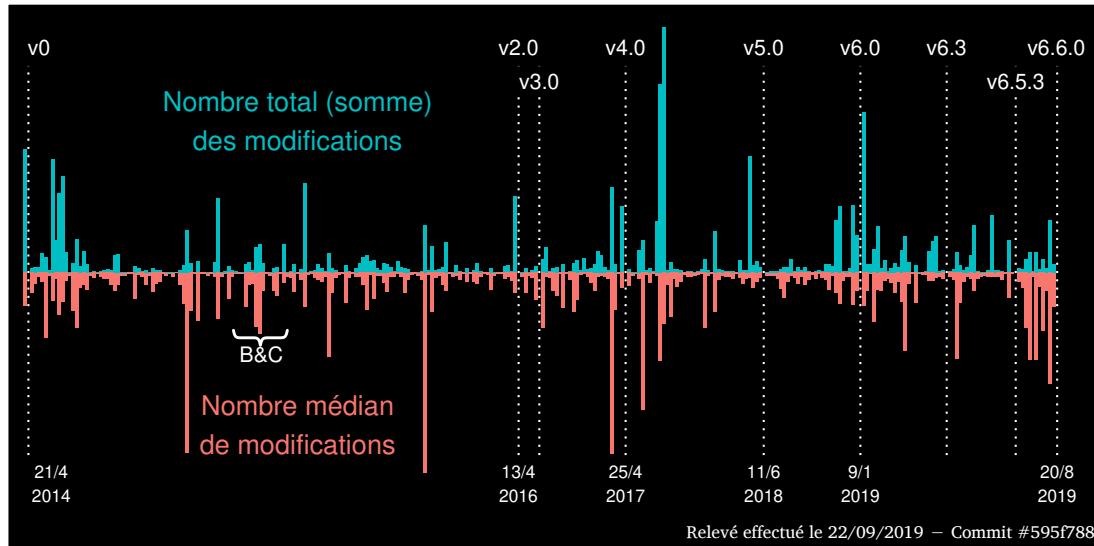


FIGURE 3.15 – Une exploration visuelle du rythme des changements de SimFeodal.
N.B. : L'axe des abscisses n'est pas linéaire du point de vue temporel : l'ordre chronologique y est respecté, mais le temps n'y est pas régulier.

On y remarque en premier lieu un certain motif, qui pourrait presque s'apparenter aux pulsations cardiaques, où l'on note des changements majeurs, espacés, entre lesquels de plus faibles phases de modifications surviennent. Ce « rythme » est avant tout une scorie de la manière dont le modèle a évolué, autour des versions représentées sur le graphique.

Les phases de plus intenses modifications, concrétisées ou précédées par des changements de version, sont ainsi intimement liées au rythme de ce travail de co-construction interdisciplinaire : les pics marquent en général la préparation, l'exécution, et les résultats immédiats des séances de travail collectives. Ces réunions étaient ainsi l'occasion d'évaluer le modèle, que ce soit en analysant ses sorties (évaluation externe) ou en ré-exposant les choix d'implémentation (évaluation interne), et en conséquence d'en mener le paramétrage, en faisant évoluer les paramètres et mécanismes. Certains pics correspondent aussi à des moments de production de « livrables », que ce soit à l'occasion de publications ou de communications, où il fallait stabiliser le modèle pour en communiquer les résultats.

À un niveau d'observation plus fin, on peut noter, aussi bien sur la somme des modifications que sur leur médiane, que les pics principaux sont le plus souvent précédés par une augmentation de la taille et de la quantité totale de modifications, puis suivis d'une diminution de ces deux indicateurs. Sur le

41. Le changement médian maximal représente un changement de 300 lignes de codes, alors que la somme concerne, elle, plus de 1500 lignes...

42. Dans cette figure, les modifications regroupées dans l'accolade « B&C » correspondent aux phases B et C identifiées dans la figure 3.14.

plan « temporel », cela correspond aux phases de préparation des réunions, faite de petites explorations locales du comportement du modèle en vu de l'adapter, puis aux phases collectives résultant sur des choix de modifications plus importantes, modifications ensuite ajustées et finalement validées, jusqu'à la réunion suivante.

Sur le plan conceptuel, cela correspond à différentes phases de construction du modèle : les modifications qui précèdent les changements de version sont d'abord assez modérées, en médiane comme en somme. Cela correspond à du paramétrage assez modéré, portant sur la modification marginale de quelques valeurs de paramètres. À mesure que la taille des *commits* augmente, ces modifications sont de plus en plus importantes, et consistent ainsi à l'ajustement de plus de paramètres, à la modification plus fréquente de détails de mécanismes, etc.

Les changements de version résultent le plus souvent d'une insatisfaction vis-à-vis de l'aboutissement de ces phases de paramétrage : même en poussant le paramétrage, même en menant un calibrage approfondi on ne parvient pas à obtenir un modèle assez satisfaisant. Il est alors nécessaire de revenir sur le modèle conceptuel et son implémentation (flèches grises de la figure 3.13), et donc de mener des modifications plus conséquentes, par exemple en transformant véritablement le fonctionnement de certains mécanismes. Les mécanismes étant modifiés, avec ajout ou suppression de paramètres par exemple, la rétro-compatibilité des sorties du modèle n'est plus assurée⁴³, et l'on change alors de version.

Après ces changements de version, la taille des modifications diminue, jusqu'à atteindre des niveaux très faibles : la somme des modifications devient négligeable (à mi-chemin entre les versions 4 et 5 dans la figure 3.15 par exemple) et la médiane des *commits* est elle aussi très faible. Cela correspond exactement aux phases de paramétrages qui suivent les changements majeurs : le nombre de changements diminue, jusqu'à aboutir sur des modifications difficilement discernables qui correspondent au calibrage. Dans cette étape, seules une ou deux lignes de code changent en général, ce qui correspond aux modifications d'une valeur de paramètre.

On retrouve donc dans cette figure, et donc dans l'évolution effective de SimFeodal, l'ensemble des étapes décrites dans ce chapitre. Des phases de construction et d'évaluation se succèdent, avec à chaque fois un travail de paramétrage, parfois suivi de nouvelles phases d'implémentation voire de conception. On notera aussi que les versions sont assez visibles sur ce graphique, correspondant aux pics principaux, de même que les sous-versions, où les pics sont plus modérés : entre la version 6 et la fin du graphique (version 6.6), on arrive même sans difficulté à identifier chacune des sous-versions intermédiaires (6.1, 6.2...).

43. Sans même considérer d'ajout/suppression de paramètre, les modifications du sens et de l'utilisation effective de certains paramètres peuvent rendre leurs valeurs non comparables avec celles des versions précédentes.

Aboutissement du paramétrage. Avec cette analyse exploratoire et l'exercice d'interprétation qui l'accompagne, nous avons voulu illustrer d'une part le processus de paramétrage mis en œuvre dans le modèle SimFeodal, mais surtout, d'autre part appuyer notre proposition de démarche de co-construction de modèles. Qui plus est dans un contexte interdisciplinaire, l'évolution du modèle ne peut ainsi passer que par des allers-retours fréquents entre son évaluation et sa modification.

Le paramétrage, et notamment sa composante de calibrage, ne peut dès lors être réduit à un exercice ultime et unique, qui visera à « finaliser » un modèle avant son emploi. Au contraire, l'application fréquente et régulière de phases d'évaluation et de paramétrage permet de garantir que les différentes pistes de modélisation explorées sont bien comparables, car justement comparées sur des versions aussi finement ajustées que possible à chaque fois.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et proposé une approche originale en matière d'évaluation de modèle de simulation à base d'agents, l'évaluation visuelle, qui nous paraît très adaptée à l'évaluation de modèles exploratoires construits dans un contexte interdisciplinaire. En proposant une évaluation basée sur la multiplication des points de vue, au moyen de nombreux indicateurs de sortie, nous pensons en effet que les différents acteurs de la modélisation peuvent chacun observer et analyser les points qui relèvent de leur expertise thématique propre. La mise en place d'une grille d'évaluation, a priori, et la hiérarchisation des critères permet de plus de garantir une vision globale de la capacité d'un modèle à produire et faire émerger les faits stylisés que l'on cherche à modéliser au sein d'une approche générative.

La forte profusion et diversité des indicateurs de sortie identifiés constitue de plus une aide précieuse au paramétrage d'un modèle : en multipliant les perspectives d'analyse des sorties d'un modèle, on facilite l'identification des mécanismes les moins satisfaisants. Avec des rapports détaillés sur le comportement d'un modèle, il est ainsi plus aisément de déterminer les composantes du modèle qui doivent être améliorés. C'est un avantage indéniable face à l'utilisation d'un indicateur quantifié unique, qui requerrait un passage systématique par une exploration globale de l'influence des paramètres et mécanismes. L'évaluation visuelle que nous proposons dans ce travail permet donc de faciliter, sur un plan conceptuel, le paramétrage, et avec lui les connaissances de chacun des membres impliqués dans la modélisation.

Nous avons toutefois aussi identifié le besoin impératif de mener cette étape de paramétrage aussi fréquemment que possible, à chaque modification du modèle. Cela implique la nécessité de mener tout aussi fréquemment une évaluation du modèle, car c'est par les allers-retours entre l'évaluation et le paramétrage que le modèle progresse.

Alors que l'évaluation visuelle facilite l'identification des défauts du modèle, elle est en elle-même complexe à mener au regard de méthodes d'évalua-

tion plus quantifiées et automatiques. Pour permettre une bonne progression du modèle, et donc l'augmentation de la fréquence des allers-retours entre évaluation et construction, il faut alors disposer d'outils permettant de faciliter et d'accélérer cette évaluation visuelle. La mise en place de solutions techniques et méthodologiques permettant de mener l'évaluation visuelle d'une manière collective et fluide revêt ainsi une portée cruciale dans la démarche de co-construction de modèle proposée dans ce travail de thèse.

5

Explorer visuellement des données de simulation massives pour analyser le comportement d'un modèle.

Version 2019-10-27

- 19/05/2019 : Reprises Lena + Envoi à Hélène
- 24/10/2019 : Reprises Hélène + Envoi à Anne & Lucie
- 27/10/2019 : Correction des mockups qui produisaient des pdf buggés

Sommaire

Introduction	97
3.1 Comment évaluer un modèle?	98
3.1.1 Évaluation, validation, vérification...	99
3.1.2 Les étapes de l'évaluation d'un modèle	102
3.1.3 Une évaluation de la plausibilité d'un modèle : la « <i>face validation</i> »	107
3.1.4 Vers une évaluation visuelle	114
3.2 Une grille d'analyse composée d'indicateurs de sortie	118
3.2.1 Indices et indicateurs	118
3.2.2 Hiérarchiser et catégoriser les indicateurs	124
3.2.3 Les indicateurs et dimensions de SimFeodal	128
3.3 Paramétrage du modèle SimFeodal	136
3.3.1 Les paramètres	137
3.3.2 Le paramétrage	148
Conclusion	164

Introduction

A écrire une fois que le chapitre aura été découpé.

-> Définir notamment la démarche :

- contraintes générales
- + type explo SimFeodal
- -> choix méthodos
- + spécificités SimFeodal
- -> choix méthodos/techniques

5.1 Capter les sorties de SimFeodal

Pour évaluer un modèle, on s'appuie sur plusieurs indicateurs de sortie de simulation, de types divers (indicateurs numériques, graphiques, cartographiques etc., cf. chapitre 3, partie théorique). Quand le nombre d'indicateurs devient important, comme c'est le cas dans le modèle SimFeodal (chap 3, partie présentation des indicateurs), la consultation des indicateurs pendant le déroulement d'une simulation devient difficile. La complexité de ces indicateurs augmente dans le cas d'un modèle stochastique, où il est nécessaire de multiplier les réplications afin d'avoir une idée fiable des tendances simulées par le modèle. Le travail de paramétrage d'un modèle requiert de plus de mener différentes expériences, c'est-à-dire de faire varier les paramètres (chap 4) du modèle, démultipliant encore la masse des sorties, et avec elle, la complexité de leur analyse.

Nous détaillons ici les contraintes qu'entraînent ces différentes spécificités des données issues de simulations. Ces contraintes sont transversales à plusieurs types de modèles, et on peut noter que certains autres types de modèles peuvent faire face à d'autres contraintes, propres ou génériques.

Dans l'ensemble, les modèles peuvent être amenés à soulever les problèmes génériques à la production de données, quelles qu'en soient la source. Cette recherche n'a pas vocation à dresser le portrait de l'ensemble des contraintes et solutions relatives à l'enregistrement et au stockage de données. Cette partie vise à identifier les plus fortes limites qui rendent difficile l'enregistrement des données issues d'un modèle de simulation à base d'agents, descriptif, fortement stochastique, et exploratoire tel que SimFeodal.

5.1.1 Masse des données

The diagram illustrates a 'Facteur multiplicatif' (multiplication factor) for data volume across different levels of simulation:

- Agents:** × 5000 [agents]
- Time steps:** × 20 [pas de temps]
- Experiences:** × 20 [réplications]
- Explorations:** × 25 [expériences]
- Total:** × 100 [explorations]

Intitulé	DONNÉES		INDICATEURS		Type de question
	Quantité	Poids	Type	Quantité	
Un agent	1 ligne	≈ 200 octets	Visualisation en direct	Attributs de l'agent	<i>Le comportement individuel des agents semble-t-il plausible ?</i>
Un pas de temps	5 000 lignes	≈ 1 Mo	Visualisations en direct	3-4 indicateurs directs	<i>Le déroulé d'une simulation semble-t-il correct ?</i>
Une simulation	100 000 lignes	≈ 20 Mo	Visualisations en direct	≈ 10 indicateurs	
Une expérience	2 millions de lignes	≈ 400 Mo	Indicateurs de sortie	≈ 30 indicateurs (variabilité des réplications)	<i>Quel est le comportement agrégé du modèle ?</i>
Un modèle paramétré ou calibré	100 millions de lignes	≈ 10 Go	Indicateurs de sortie	≈ 3000 indicateurs (à comparer entre les expériences)	<i>Peut-on obtenir un meilleur ajustement du modèle ?</i>
Un modèle exploré/connu	10 milliards de lignes	≈ 1 To	Indicateurs numériques synthétiques	—	<i>Comment le modèle réagit-il aux variations de ses paramètres ?</i>

TABLEAU 5.1 – Synthèse des questionnements liés à l'exploration de données issues de modèle et de la multiplication des données et indicateurs selon la hiérarchie des simulations.

Dans un premier temps, il convient de noter que l'ensemble des indicateurs observés en sortie de SimFeodal reposent sur des données qu'il est nécessaire de produire et d'enregistrer tout au long de la simulation. Ainsi, pour pouvoir tracer le graphique de l'évolution du nombre d'agrégats au cours du temps, il faut avoir accès à cette information, et dès lors, enregistrer, à chaque pas de temps, cette valeur dans un fichier numérique adapté. Cette information, en tant que telle, est assez faible, aussi bien en valeur sémantique qu'en valeur prise en mémoire. La masse représentée par cette information est toutefois démultipliée par la quantité d'indicateurs de sortie : plus ces derniers sont nombreux, plus la quantité de valeurs à stocker augmente. À chaque pas de temps, il faudra enregistrer les valeurs de plusieurs variables (voir tableau 5.1). Cette pratique est habituelle, et un format de données tabulaire se prête bien à un tel enregistrement : une ligne pour chaque pas de temps, et une colonne pour chaque variable à enregistrer. On obtiendrait ainsi en sortie de simulation un tableau contenant 20¹ lignes et une cinquantaine de colonnes², ce qui serait assez raisonnable pour une unique simulation.

Évolution des indicateurs. Dans le cadre d'un modèle exploratoire (cf. chapitre 1), cette solution doit être écartée car elle ne permet pas de faire face à d'éventuelles évolutions des indicateurs au fur et à mesure du cycle de vie du modèle. Au fur et à mesure que le calibrage d'un modèle progresse, par exemple, on peut chercher à raffiner les indicateurs utilisés. Les indicateurs utilisés au départ peuvent alors ne plus montrer assez de variabilité entre des versions très proches de modèles. En effet, quand l'ajustement des données produites par la simulation aux objectifs empiriques s'améliore, il peut être difficile de départager plusieurs versions concurrentes d'un modèle. On peut alors chercher à créer de nouveaux indicateurs, qui donneront une information plus détaillée sur l'un des résultats de simulation.

Cet exemple illustre le cas des ajouts d'indicateurs de sorties, mais on peut aussi être confronté à des modifications des indicateurs existants. Dans SimFeodal, par exemple, le nombre de paroissiens moyen à chaque pas de temps peut être un indicateur utile au départ, mais on peut être amené à faire évoluer cet indicateur en une étude de la médiane si les nouvelles étapes de paramétrage du modèle en augmentent la variabilité.

Les indicateurs peuvent donc évoluer au cours du temps de vie du modèle (cf. encadré chap 3), ou plus simplement, on peut être amené à réaliser une observation plus fine des sorties du modèle au fur et à mesure de l'analyse de ce dernier. On se trouverait alors dans une situation impossible requérant de ré-exécuter les simulations après avoir adapté ou mis en place l'indicateur

1. Il s'agit ici du nombre de pas de temps de SimFeodal. On notera que ce nombre est particulièrement faible au regard de très nombreux modèles de simulation, en particulier vis-à-vis de ceux qui visent à provoquer l'émergence d'un phénomène. Ces modèles sont en général théoriques, et n'ont qu'une faible correspondance entre pas de temps et durée réelle du phénomène modélisé. Dans le cas de SimFeodal, où le temps est un élément crucial du modèle, la résolution temporelle du modèle ne peut être diminuée artificiellement (voir chap2, section 2.2.2.2), et l'on se satisfait donc de ce nombre d'itérations relativement faible.

2. Ce qui correspondrait par exemple à environ une colonne par indicateur, en plus des quelques colonnes de bases relatives à l'état d'ensemble de la simulation.

voulu.

Données agrégées et individuelles. Un dernier point invalide cette solution d'enregistrement : une part importante des indicateurs s'appuie sur des données individuelles et non agrégées. Ainsi, on peut, à chaque pas de temps, enregistrer le nombre de paroisses, leur superficie moyenne ou encore le nombre moyen de paroissiens que chacune dessert. Mais cela ne permet en aucun cas d'en dresser une cartographie, c'est-à-dire de réaliser une carte de la localisation et des aires d'attraction des paroisses. Cela demanderait, par définition, d'enregistrer la géométrie de chaque paroisse à chaque pas de temps, les configurations spatiales (localisation de chacune et donc distribution spatiale de l'ensemble) variant à chaque simulation.

Pour faire face à cette situation, on a donc fait le choix, dans SimFeodal, d'enregistrer les états des variables à des niveaux d'agrégation multiples, y compris au niveau de l'agent, à chaque pas de simulation. Dans le cas des paroisses, le volume de données résultant reste contenu : on obtient un tableau d'environ 2000 lignes³ et une dizaine de colonnes⁴. L'enregistrement systématique de l'état de chaque agent à chaque pas de temps est toutefois bien plus gênant dans le cas d'autres agents, par exemple les foyers paysans. Il est en effet nécessaire d'enregistrer les attributs de chacun d'entre eux pour être en mesure d'étudier les liens entre les valeurs de satisfactions et les choix de déplacement, ou encore d'observer la composition précise de la distribution des satisfactions. Avec 4000 foyers paysans au minimum à chaque pas de temps, les données changent d'ordre de grandeur⁵ : chaque simulation requiert de générer un fichier contenant des dizaines de milliers de lignes, pour un total, pour cet unique fichier, d'une dizaine de mégaoctets occupés.

Au final, l'enregistrement d'un état représentatif d'une simulation est difficile. Cela requiert de disposer de suffisamment d'éléments numériques pour pouvoir générer les indicateurs de sortie et rendre compte d'une partie de leur évolution. La masse de données produite est de ce fait nécessairement conséquente, comme indiquée dans la ligne « simulation » du tableau 5.1.

Coût temporel des simulations. Un dernier aspect de l'exploration de données issues de simulations, primordial, vient finir invalider l'approche d'enregistrement direct des indicateurs : le coût temporel. L'exécution d'une simulation requiert un certain temps de calcul (3 à 4 minutes pour une exécution du modèle SimFeodal dans la version présentée dans le chapitre 2). Ce temps de calcul ne peut être optimisé que dans des proportions faibles sans avoir à bouleverser l'implémentation des mécanismes, ce qui représenterait un coût temporel encore plus important (voir la succession d'étapes du chapitre 4). En l'état actuel du modèle, la production des données a donc un coût temporel

3. Avec une moyenne de 150 paroisses, cela représente $20 \text{ [pas de temps]} \times 150 \text{ [paroisses]} \approx 3000$ lignes pour chaque simulation.

4. Les identifiants de la simulation (nom, graine aléatoire), le pas de temps, l'identifiant de la paroisse, puis les différents attributs et enfin la géométrie stockée dans une colonne textuelle.

5. $20 \text{ [pas de temps]} \times 4000 \text{ [foyers paysans]} \approx 80\,000$ lignes pour une exécution du modèle.

élevé.

Qui plus est, ce coût est fortement dépendant du nombre de simulations exécutées : si le modèle est exploratoire, donc sujet à de nombreux changements, et notamment à l'ajout ou à la modification des indicateurs observés, il peut donner lieu à d'encore plus nombreuses simulations. Avec une structure de données fixe et agrégée, on ne pourrait introduire de nouveaux indicateurs, et la mise en comparaison des simulations précédentes impliquerait leur adaptation et re-production, c'est-à-dire la ré-exécution systématique de l'ensemble des simulations précédentes à chaque changement dans les indicateurs. L'introduction de nouveaux indicateurs est pourtant très fréquente, en particulier dans le cas d'un modèle exploratoire où l'on affine au fur et à mesure de l'évolution du modèle ce que l'on peut y observer.

En tenant compte de ces éléments, on a tout intérêt à se prémunir de ré-exécutions du modèle, et donc à enregistrer l'état de variables qui ne seraient pas encore mobilisées pour la production d'indicateurs. Dans l'exemple du nombre de paroissiens, il faudrait en enregistrer au minimum les moyennes, médianes, et sans doute quelques paramètres de dispersions en plus, voir les quantiles, afin d'adapter les indicateurs de sortie de la manière la plus adéquate aux sorties des différentes versions du modèle. Dans le cas contraire, pour chaque changement ou ajout d'indicateur, il faudrait relancer des exécutions du modèle sur l'ensemble des jeux de paramètres précédents afin d'être en mesure d'avoir des indicateurs comparables entre les versions.

Enregistrer l'ensemble des variables d'un modèle est aisé dans le cas d'un modèle théorique simple, par exemple dans le cas d'un modèle comme celui de Schelling (SCHELLING 1971). Cela se complique quand il s'agit d'enregistrer les variables d'un modèle plus complexe comme SimFeodal. Celui-ci requiert en effet bien plus de variables globales ([ref chapitre 4, dans distinctions variables, paramètres etc.](#)), pour représenter l'état du système dans son ensemble à chaque instant. Surtout, SimFeodal est un modèle qui voit interagir plusieurs sortes d'entités, chacune relatives à différents niveaux de granularité spatiale et sociale. Afin d'avoir tous les éléments en main une fois la simulation achevée, il est donc nécessaire d'enregistrer l'ensemble des variables non seulement globales, mais aussi afférentes à chacun des types d'agents. D'un unique tableau de données exhaustif en sortie du modèle de Schelling, on passe donc à plusieurs tableaux, dont les variables respectives seront propres à chaque type d'agent.

De plus, pour que les résultats de simulations soient comparables tout au long du développement du modèle, en dépit de l'évolution des indicateurs qui les constituent, il est nécessaire d'enregistrer l'état individuel des agents, et pas seulement des données agrégées. Cela démultiplie la quantité d'informations qu'il est nécessaire de stocker (ligne « simulation » du tableau 5.1), qui plus est quand le nombre d'agents est important⁶.

6. Dans les dernières versions de SimFeodal, dont les résultats sont présentés dans le [chapitre 6](#), on est passé de 4 000 foyers paysans à 40 000. On peut donc décupler les valeurs des colonnes « quantité » et « poids »...

5.1.2 Tenir compte de la stochasticité du modèle - les répli-cations

Un modèle stochastique. Comme on l'a vu dans le chapitre 3, une simulation ne suffit pas à évaluer le modèle. SimFeodal est ainsi un modèle stochastique, c'est-à-dire qu'une large partie des mécanismes qui l'animent sont basés sur des tirages aléatoires. Cet aléa est évident dans les mécanismes faisant appel à un tirage aléatoire explicité, par exemple le choix de déplacement ou non d'un foyer paysan (cf. chap2, mécanisme déplacement). Dans le cas de ce mécanisme, un foyer paysan mobile se déplacera selon une probabilité dépendant de sa satisfaction. Et s'il y a probabilité, il y a donc aléa. Même avec une forte satisfaction — 99% par exemple —, il reste 1% de chance qu'un foyer se déplace, ce qui, sur un grand nombre de tirages (chaque foyer paysan, à chaque pas de temps), aboutit à une probabilité de réalisation non négligeable. Et cette probabilité de réalisation sera encore supérieure pour des foyers paysans ayant des niveaux de satisfaction légèrement moindre mais cependant globalement très élevés, supérieurs à 90% par exemple. En analysant les sorties du modèle, on aura donc la présence d'*outliers*, qu'il sera important d'isoler. Ils présenteront en effet des comportements contre-intuitifs puisque résultant d'une probabilité extrêmement faible. L'aléa a un poids important dans ce type de mécanisme.

Même dans le cas de mécanismes plus anodins, l'aléa est fortement présent, puisqu'il est au cœur de la conception de SimFeodal. L'ordre d'exécution, c'est-à-dire l'ordre aléatoire dans lequel les agents sont appelés pour exécuter leurs mécanismes, aura donc un impact important sur les indicateurs de sortie de simulation, sans que cet impact ne puisse être caractérisé au moyen d'indicateurs agrégés. Par exemple, les seigneurs peuvent créer des châteaux, sous condition de puissance (cf. chapitre 2, section 2.3.12). Pour créer ces châteaux, il faut que des agrégats soient « disponibles », c'est-à-dire ne comportent pas de château pré-existant à une certaine distance. Cette contrainte devient rapidement le facteur principal de la limitation de l'apparition de châteaux. Si un seigneur est plus souvent que les autres « appelé » en premier pour exécuter ce mécanisme, il pourra profiter des nouveaux agrégats disponibles pour créer ses châteaux. À force de création de châteaux, il sera relativement plus puissant, et pourra donc créer d'autant plus de châteaux relativement aux autres seigneurs. Il y aura donc une hiérarchie forte dans le nombre de châteaux possédés par seigneur.

Au contraire, si l'ordre d'appel des mécanismes favorise des seigneurs différents à chaque pas de temps, alors plus de seigneurs seront en mesure de créer des châteaux, et la hiérarchie sera alors plus faible.

Ces mécanismes sont sensibles à l'ordre d'appel, et il est ainsi difficile de discerner ce qui relève d'une tendance simulée et ce qui relève de fines variations dues à l'aléa, dans le comportement du modèle.

Un modèle complexe. On pourrait objecter qu'en considérant les agents de manière agrégée, donc globale, les tirages de probabilité seront appliquées à suffisamment d'individus pour que le résultat statistique soit cohérent et robuste au niveau de la population dans son ensemble. En corollaire, le compor-

tement de chaque agent serait régulé par tant d'états aléatoires qu'on entraîrait dans le cadre d'application de la loi forte des grands nombres, les agents adoptant alors en moyenne un comportement proche de l'espérance (moyenne théorique) de chaque tirage. Avec ces considérations, on pourrait justifier la robustesse probable des différentes exécutions de SimFeodal.

SimFeodal n'est toutefois pas simplement un modèle stochastique, mais avant tout, un modèle complexe, c'est-à-dire s'inscrivant dans le champs des systèmes complexes. Sans vouloir ici entrer dans les détails des implications et raisons de ceci, on peut simplement en retenir qu'un modèle tel que SimFeodal est extrêmement sensible aussi bien aux conditions initiales qu'aux différents tirages aléatoires (voir l'analyse de sensibilité, chap 6, section 6.3).

Pour illustrer, on peut s'appuyer sur un exemple, caricatural mais possible : à l'initialisation, tous les foyers paysans, placés aléatoirement dans l'espace, seraient concentrés dans un espace d'étendue restreinte. Seul un énorme agrégat émergerait donc, et aucun pôle ne serait susceptible dès lors de diviser cet agrégat géant. On atteindrait ainsi une situation très éloignée des configurations spatiales observées empiriquement, et très éloignée aussi des réalisations habituelles du modèle. En présence d'un seul agrégat, les possibilités de développement d'attracteurs (châteaux et paroisses) pourraient tout aussi bien être fortes que faibles. À partir d'une telle configuration initiale, on ne peut savoir si la situation convergerait vers un agrégat « paradisiaque », extrêmement développé et doté de pôles satisfaisants, ou au contraire, vers un agrégat « prison », où aucun des foyers paysans ne serait satisfait, mais n'aurait non plus d'alternative.

Cet exemple fictif, volontairement caricatural, ne s'est pas présenté jusqu'ici, mais le cas échéant il faudrait pouvoir repérer ce type de comportement aberrant. Cela serait par exemple utile pour éventuellement les distinguer des autres simulations et ne pas le laisser contrôler l'analyse d'un jeu de paramètres données. De plus, cet exemple concerne uniquement une configuration initiale qui présenterait des caractéristiques tout à fait exceptionnelles. Plus généralement, il existe un grand nombre de situations initiales potentielles éloignées de l'empirique et même du vraisemblable. Les réalisations aberrantes peuvent apparaître à toute étape de la simulation, et déformer les tendances observées dans les indicateurs de sortie du modèle. Au delà de l'initialisation, elles peuvent être issues de tirages aléatoires particulièrement défavorables, ou encore apparaître suite à une succession d'événements improbables qui s'autorenforcent. Pour distinguer ces réalisations aberrantes de ce que l'on pourrait caractériser d'une tendance normale, il est nécessaire de multiplier les réplications, afin de constituer un contexte suffisant pour isoler ces événements anormaux.

Enregistrement des réplications. On ne peut donc pas raisonner sur une unique simulation pour évaluer un jeu de paramètres (cf. chap 3). On ne peut pas non plus se contenter d'une agrégation des résultats des différentes réplications, sous la forme de moyennes ou d'écart-types, selon qu'on s'intéresse par exemple à la tendance générale ou qu'on cherche à observer les variations

que peut entraîner l'aléa.

Pour ces raisons, et pour être en mesure d'embrasser l'entièvre diversité des sorties de simulations issues de variation de la graine aléatoire, il est donc nécessaire de mener plusieurs réplications de chaque simulation, et d'enregistrer l'entièreté des sorties de simulations dans chacun des cas. Le jeu de données produit par une simulation, contenant quelques dizaines de milliers de lignes, est ainsi obligatoirement multiplié par le nombre de réplications. Pour l'exploration de SimFeodal, après différents tests, ce nombre a été fixé à 20 réplications (*J'en aurais sans doute parlé dans le chapitre 3 (évaluation), mais à laisser ici jusqu'à ce que ce soit certain.*). La vingtaine de mégaoctets issue d'une simulation devient donc approximativement 400 mégaoctets, et le nombre de lignes contenues, par exemple pour les foyers paysans, passe d'environ cent mille à deux millions⁷ (voir la ligne « expérience » du tableau 5.1).

5.1.3 Des réplications aux expériences

Comme décrit dans le [chapitre 4](#), le paramétrage de SimFeodal a demandé plusieurs étapes⁸. De plus, chacune de ces étapes représente plusieurs sous-étapes – les expériences – faites d'essais et d'erreurs, en faisant varier à chaque fois les valeurs de paramètres de SimFeodal. Afin de construire le modèle, puis de l'explorer de manière plus systématique, il a été nécessaire de tester des dizaines de configurations de paramètres. Pour comparer, à chaque nouvelle version du modèle, les résultats produits par rapport aux résultats de la version précédente, il est indispensable de conserver, au minimum, l'ensemble des jeux de données de cette version précédente.

Cet archivage des résultats immédiatement précédents n'est pourtant pas suffisant, pour des raisons tenant à la reproductibilité et à traçabilité du modèle obtenu au final. On serait en effet tenté, à chaque nouvelle version « majeure » du modèle, de ne conserver que les indicateurs de sorties des versions précédentes en considérant que le modèle a atteint une phase de maturité supérieure à chaque fois. Les étapes intermédiaires, reléguées au rang de brouillons ou d'esquisses, deviendraient alors inutiles. Le processus de conception et de paramétrage d'un modèle n'est pourtant pas linéaire (cf. [chapitre 4](#)), et on peut avoir besoin de comparer une version intermédiaire « actuelle » à une version intermédiaire précédente, quitte à réaliser qu'une modification erronée a été ajoutée au modèle.

La conservation des résultats de chacune des expériences joue donc à nouveau un rôle multiplicatif dans la masse de données à conserver (voir le tableau 5.1).

En supposant que le modèle ait compté environ 25 versions⁹, on obtient envi-

7. Si cette quantité de données semble tout à fait raisonnable et peut largement être traitée sur un ordinateur classique, on peut toutefois noter qu'elle dépasse déjà le maximum de lignes (limitées à 2^{20} , soit un peu plus d'un million) que les tableurs classiques – LibreOffice ou Microsoft Excel dans leurs dernières versions – sont en capacité de gérer.

8. [Y mettre un tableau avec les versions + nombre de sous-version du modèle.](#)

9. Dans SimFeodal, par exemple, on distingue 6 versions « majeures » (cf. [tableau dans](#)

ron 500 simulations à stocker, puis à devoir analyser et comparer. Cela représente une somme considérable de données (voir tableau 5.1), qui se chiffrent en dizaines de millions d'enregistrement¹⁰.

En matière de stockage, il ne s'agit jamais que de quelques gigaoctets de données, pourtant à la limite de ce que l'on peut traiter sur un ordinateur individuel¹¹.

On ne mentionne ici que les expérimentations issues des étapes de paramétrage. Les phases suivantes, visant à l'exploration du comportement du modèle (analyse de sensibilité, calibration...), demandent ainsi d'exécuter, et donc d'enregistrer, une masse bien plus importante de simulations.

5.1.4 Des données aux indicateurs

Dans l'ensemble, l'enregistrement et la sauvegarde des données issues de simulations constituent, pour les modèles de simulations basés sur de nombreux agents et mécanismes, une contrainte importante vis-à-vis de l'exploration du comportement de ces modèles.

C'est particulièrement le cas pour SimFeodal, où l'on ne peut se contenter de produire à la volée les indicateurs pour des raisons de reproductibilité¹².

Analyser une masse de données. La masse de données en sortie est impressionnante et requiert dès lors, d'un point de vue technique, d'utiliser des outils adaptés à la manipulation de grands jeux de données. Cela exclut de fait l'outillage habituel, accessible, de la géographie quantitative, ne laissant par exemple pas la possibilité d'utiliser les outils à interface graphique classiques. Au contraire, face à des données de cet ordre, seules des solutions statistiques, basées sur des analyses en ligne de commande, peuvent être mobilisées. Ces solutions doivent en plus être appuyées par des capacités de calculs importantes, sans toutefois justifier encore l'usage de technologies de calcul intensif¹³. Cela pose une contrainte dans l'accessibilité aux analyses : le traitement des données requiert des compétences spécifiques en analyse de données volumineuses. Dans un contexte interdisciplinaire caractérisé par une large hétérogénéité en matière de pratiques quantitatives, il n'est pas possible de se contenter d'envoyer les jeux de données produits aux thématiciens – qui ne disposent le

chap 4, elles-mêmes composées de 4 à 10 sous-versions) à corriger quand tableau finalisé.

10. $20 \text{ [pas de temps]} \times 5000 \text{ [agents]} \times 20 \text{ [réplications]} \times 25 \text{ [jeux de paramètres]} \approx 100\,000\,000$ de lignes enregistrées pour les agents (4 000 foyers paysans et environ 1 000 autres agents).

11. Selon une approximation courante, on ne peut charger en mémoire des données d'une taille supérieure à la moitié de la mémoire vive. Approximation qui approche du tiers quand on prend en compte les autres processus en cours, et éventuellement des modifications à l'échelle de l'ensemble du jeu de données plutôt que sur des extraits. Pour pouvoir traiter ces 5 Go de données (tableau 5.1), l'ordinateur utilisé doit donc disposer d'au moins 16 gigaoctets de mémoire vive, et encore, au prix d'un traitement potentiellement lent et bloquant.

12. La reproductibilité sera abordée dans le chapitre 1 (positionnement).

13. Le « High-Performance Computing » (HPC) par exemple, mobilisé pour l'étude de données plus massives, c'est-à-dire trop importantes pour être analysées sur un unique ordinateur ou serveur. Voir REY-COYREHOURCQ (2015, p. 223–283) pour un historique détaillé des usages HPC en SHS, et particulièrement en géographie.

plus souvent pas de ces compétences – : ils seraient alors en difficulté pour en tirer les analyses nécessaire à leur interprétation.

Analyser une masse d'indicateurs. D'un point de vue thématique, et c'est là l'objectif, cette masse de données doit servir à la production d'indicateurs, nombreux et divers aussi bien dans leur forme que dans les caractéristiques des processus qu'ils décrivent (ref. chap. 3, indicateurs). Les mêmes raisonnements, « multiplicatifs », que pour les données s'appliquent ainsi aux indicateurs. On peut rendre compte de la variabilité des réplications directement dans les indicateurs produits (par exemple avec des représentations graphiques de type *box-plot*, utilisés ici pour une large partie des indicateurs).

La production de tels indicateurs au niveau de la variabilité inter-expérience est pourtant difficile, si tant est qu'elle soit souhaitable. De fait, chaque expérience doit pouvoir être comparée aux précédentes sur la base de leurs seules réplications respectives. Dès lors, la raison d'être des indicateurs de sortie est de rendre possible une comparaison, indicateur par indicateur, entre chacune des expériences. Il est donc indispensable de générer, pour chaque expérience, l'ensemble des indicateurs. En ne considérant ici encore que 25 expériences, cela fait donc déjà plusieurs centaines¹⁴ d'indicateurs (tableau 5.1).

Le choix ayant été fait de mener une comparaison visuelle (ref. dans chapitre 3 : indicateurs uniques vs fonctions objectifs), on imagine dès lors que celle-ci va être difficile en présence de tant d'indicateurs.

En sus de la contrainte de l'enregistrement et de la production des indicateurs, le verrou majeur à l'exploration du comportement attendu de SimFeodal est donc la simple capacité à visualiser et à explorer l'ensemble des indicateurs de sortie. Ce qui doit de plus être rendu accessible y compris pour un auditoire non habitué à la manipulation de nombreuses données et sorties quantitatives.

14. En considérant ainsi une trentaine d'indicateurs, on obtient donc $30 \text{ [indicateurs]} \times 25 \text{ [jeux de paramètres]} \approx 750$ indicateurs uniques.

5.2 Comment explorer les sorties de SimFeodal ?

Pour évaluer, de manière approfondie, une expérience (voir tableau 5.1) d'un modèle tel que SimFeodal, il est nécessaire de passer en revue de nombreux indicateurs de sortie de simulation. Cette évaluation ne vise pas à produire une « note » unique et synthétique, mais plutôt à tester la capacité de l'expérience à reproduire les dynamiques que le modèle cherche à reproduire. Il ne s'agit pas, à proprement parler, d'une validation du modèle, au sens quantitatif où on pourrait l'entendre.

On vise plutôt à explorer le comportement du modèle en fonction des mécanismes et valeurs de paramètres choisis. Cela aboutit donc sur un jugement qualitatif sur la capacité du modèle à reproduire les dynamiques souhaitées. Pour mener cette exploration, il convient d'utiliser des outils adaptés, c'est-à-dire de disposer de solutions techniques permettant le calcul et l'affichage des indicateurs à partir des données produites par le modèle.

Dans le travail mené autour de SimFeodal, plusieurs solutions ont été utilisées au cours des différentes étapes de construction du modèle. La restitution purement chronologique de ces solutions ne revêt pas d'intérêt propre, mais les contraintes accumulées au cours de la construction du modèle ainsi que les choix devant permettre de les dépasser nous paraissent très largement génériques et généralisables.

La succession de choix d'outils d'explorations se justifie par les verrous dans l'exploration que chacun de ces outils a permis de débloquer. Cela dresse par là-même un portrait des solutions méthodologiques d'exploration de données de simulations dont on peut faire usage selon les contraintes générales des modèles.

5.2.1 Observer les simulations en direct ou *a posteriori*

Classiquement, le premier réflexe d'un modélisateur, du moins pour les modèles à base d'agents, est de définir des sorties graphiques pour accompagner son modèle. Les différentes plate-formes de modélisation agent mettent d'ailleurs régulièrement en avant les possibilités de représentations qu'offrent leurs environnements¹⁵. Visualiser le déroulement d'un modèle « en direct » (« *online* » dans GRIGNARD et DROGOUL 2017), c'est-à-dire au sein de la plate-forme de simulation et au cours l'exécution du modèle, offre ainsi de nombreux avantages : évaluation visuelle du niveau de ségrégation (et de son évolution) dans une implémentation du modèle de Schelling ; visualisation de cohérence du déplacement des nuées d'oiseaux dans un modèle de type « Flocks » (REYNOLDS 1987) ; ou encore suivi d'un indicateur dans le temps – la quantité de ressources collectées – dans un modèle de type « Sugarscape » (EPSTEIN et AXTELL 1996).

15. Voir par exemple les collections de visualisations sur les pages d'accueil de Gama (<https://gama-platform.github.io/>), de NetLogo (<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>), de GeoMASON (<https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/extensions/geomason/>) ou encore de Repast (<https://repast.github.io/screenshots.html>).

Visualisation des simulations en direct. Il est à noter que dans le cadre du développement d'un modèle de simulation, l'implémentation du modèle et de son interface graphique sont étroitement liées. D'une part, la plateforme de modélisation choisie constraint fortement le type et la diversité des représentations. Gama et GeoMASON, par exemple, proposent des modes de visualisation de données géographiques bien plus avancés que NetLogo ou Repast. L'interface graphique développée pour chaque modèle est donc largement influencée par la plateforme de simulation dans laquelle il est exprimé. D'autre part, dans la plupart de ces plateformes de simulation, l'interface graphique est implémentée au même niveau que le code-source du modèle en lui-même. Dans NetLogo et Gama par exemple, l'interface graphique est programmée directement dans le modèle en lui-même, en se basant sur les variables qui y sont déclarées. Il n'est donc pas possible de créer une interface graphique générique au sein des plateformes de simulation, laquelle pourrait s'appliquer à plusieurs modèles différents. Il est nécessaire, pour chaque modèle, de reconstruire l'interface depuis les briques de bases proposées par les plateformes, c'est-à-dire un ensemble de primitives graphiques permettant de composer une interface intégrée au modèle.

Dans l'exploration de SimFeodal, la création en direct de quelques graphiques correspondant à des indicateurs étudiés permet d'assurer un rôle de filtrage, grossier, à l'exécution d'une expérience, c'est-à-dire de l'ensemble des réplications nécessaires à son évaluation. Après une modification du code-source du modèle, et avant de lancer de nombreuses simulations, on exécute quelques simulations « manuellement ». On s'assure alors, en direct, que les indicateurs affichés ne présentent pas de caractères aberrants. Cela permet de vérifier, avant de lancer des calculs plus conséquents, que le déroulement de la simulation semble cohérent, c'est-à-dire, le plus souvent pour des modifications mineurs du modèle, qu'un *bug* n'a pas été introduit involontairement.

Le recours à ce type de visualisation en direct des simulations ne peut toutefois être généralisé, c'est-à-dire sorti de son rôle de pré-filtre, en raison de deux principales contraintes.

Visualisation en direct et réPLICATION. La première contrainte, déjà évoquée plus haut, est que le modèle SimFeodal est fortement stochastique. Dès lors, la visualisation des indicateurs d'une simulation particulière n'est pas suffisante pour estimer le comportement du modèle. En conséquence, les indicateurs choisis pour l'évaluation de SimFeodal prennent presque tous en compte la variabilité des résultats induite par l'exécution de réplications. Certaines plateformes de simulation multi-agents¹⁶ permettent toutefois de mener concurremment plusieurs réplications d'un même modèle et de visualiser directement pendant l'exécution les résultats agrégés des réplications. Cette première contrainte, liée au besoin d'analyser des réplications plutôt que des exécutions isolées, peut donc être dépassée en adaptant l'implémentation du modèle pour faire usage de ces capacités de multi-simulation.

16. Gama dans sa dernière version (1.8) par exemple, voir <https://gama-platform.github.io/wiki/RunSeveralSimulations.html>.

Visualisation multi-indicateurs. La seconde contrainte est cruciale dans le cas de SimFeodal et invalide l'usage des méthodes de visualisation en direct. On l'a vu, l'exploration des sorties de simulation du modèle repose sur la consultation systématique de plusieurs indicateurs, dont le nombre peut se révéler important pour une analyse approfondie.

Tout d'abord, il est concrètement difficile de représenter tous ces indicateurs au sein de l'interface graphique d'une plate-forme de simulation agent, comme on peut le remarquer, par exemple en figure 5.1 : l'espace occupé par les quelques indicateurs temporels et numériques affichés est déjà important et rend l'interface d'ensemble complexe. De plus, et c'est sans doute le verrou majeur, la temporalité de l'exécution d'une simulation – ou même des réplications nécessaires – est bien plus courte que celle requise pour la compréhension des résultats produits. Une simulation requiert ainsi au maximum quelques minutes. Pour pouvoir examiner tous les indicateurs pendant cette durée, il serait nécessaire de mettre la simulation en pause régulièrement, presque à chaque pas de temps. On disposerait alors d'un temps suffisant pour observer les indicateurs (organisés en onglets dans l'interface visible dans la figure 5.1). L'analyse des indicateurs de sortie de simulation demandent en effet un examen approfondi, et non simplement superficiel, pour pouvoir juger de l'adéquation de ce que ces indicateurs représentent vis-à-vis des attentes thématiques.

Visualisation différée. Cette contrainte est renforcée par la pratique d'évaluation que la plupart des chercheurs mobilise. L'évaluation n'est pas une étape unique et finie, il est utile de pouvoir revenir sur les résultats à différents moments. Cela est par exemple nécessaire quand il s'agit de comparer de nouveaux résultats produits à ceux générés par des expérimentations antérieures. On ne peut alors se contenter d'évaluations en direct, même en y consacrant un temps important, simplement parce que par nature, ces évaluations seront à reproduire en plusieurs occasions, et qu'il ne serait alors pas raisonnable de relancer, à chaque fois, de nouvelles simulations correspondant à des configurations de paramètres et de mécanismes déjà éprouvées.

Visualisations multiples. Un dernier élément contribue à la difficulté de se baser sur une évaluation en direct : en plus du chercheur, amené à revenir de multiples fois sur les résultats d'une expérience, un modèle co-construit peut être évalué par plusieurs chercheurs différents. C'est d'autant plus fréquent en situation d'interdisciplinarité, où les points de vue de chacun des membres sont complémentaires et nécessaires. Sauf à faire preuve d'une discipline exacerbée, par exemple en réalisant l'ensemble du travail d'évaluation uniquement en séances de travail simultanées et collectives, l'évaluation par plusieurs personnes demande que chacun puisse mener ces analyses selon ses propres temporalités. En choisissant de baser l'évaluation d'un modèle uniquement sur une analyse en direct, il faudrait alors que chaque chercheur, à chaque fois qu'il souhaite évaluer une même expérience, ré-exécute le modèle de nombreuses fois. Cela serait naturellement possible, mais constituerait clairement un gâchis certain de ressources.

que difficilement être réalisé en direct, qui plus est quand elle demande de faire appel, dans un cadre de co-construction, à plusieurs points de vue hétérogènes. Les modalités mêmes de l'exploration des sorties d'un modèle à évaluation visuelle requièrent donc que les indicateurs soient accessibles et explorables à des temporalités différentes, par des chercheurs différents, depuis des lieux divers.

Il est donc indispensable que les indicateurs soient enregistrés et consultables simplement à tout moment, *a posteriori* des simulations, ce qui élimine de fait la visualisation des indicateurs en direct pendant l'exécution des simulations comme unique méthode d'exploration du comportement des modèles exploratoires et descriptifs.

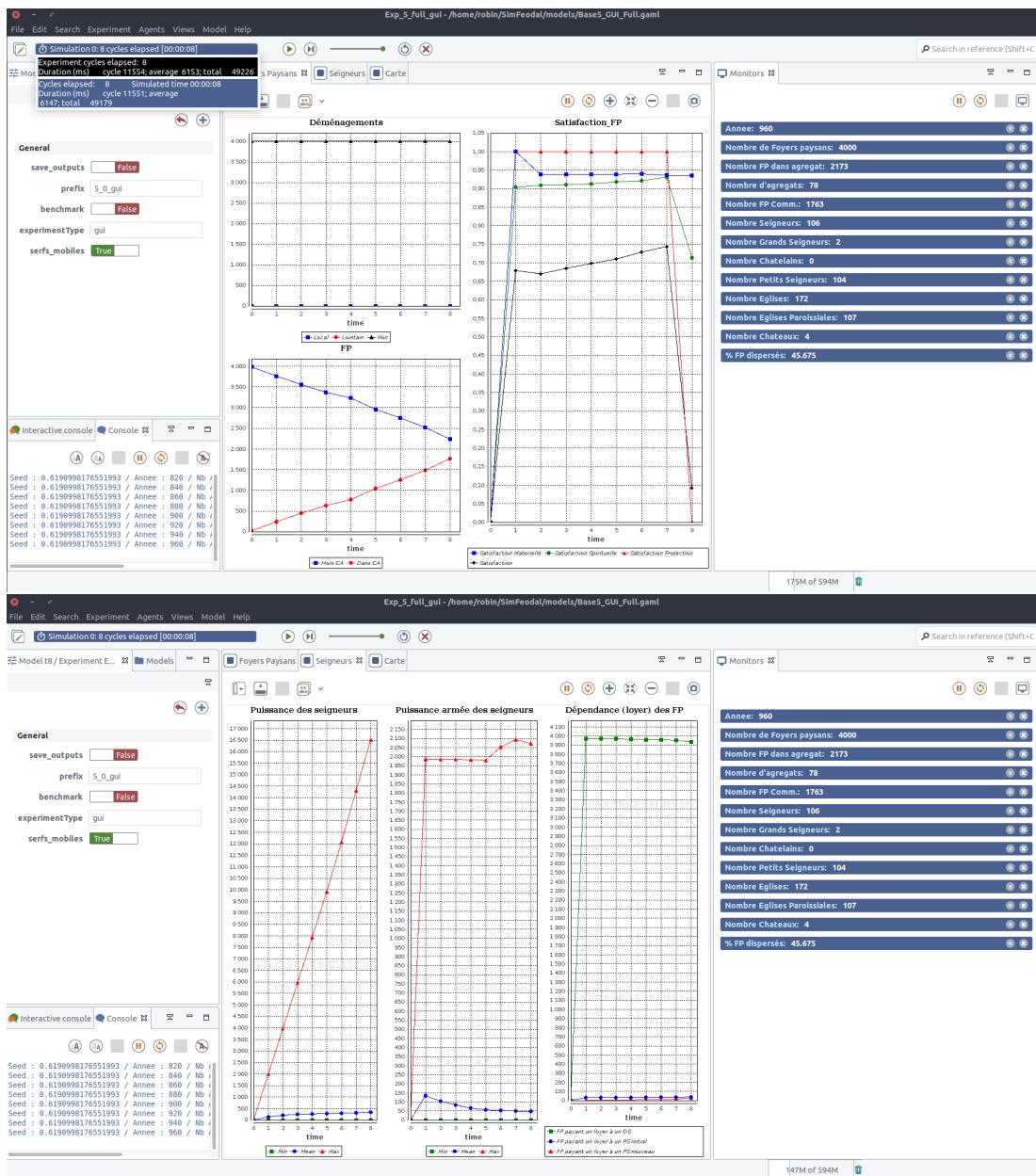


FIGURE 5.1 – Indicateurs intégrés à l'interface graphique interne de SimFeodal.
N.B : Dans ces captures d'écrans, il s'agit d'indicateurs liés aux foyers paysans et aux seigneurs.

Visualiser en direct pour pré-filtrer. Dans le cadre de la construction et du paramétrage de SimFeodal, nous avons cependant mobilisé ce type de visualisation en direct, comme on peut le constater dans l'interface graphique

du modèle (figures 5.1 et 5.2). La visualisation en direct n'est donc pas mobilisable en tant que méthode d'évaluation principale, mais elle peut tout de même, comme dans un usage très classique, être utilisée comme un outil de validation interne pour tester chaque modification dans les valeurs de paramètres, remplissant alors le rôle de « préfiltre » décrit auparavant. Visualiser une seule simulation, avant d'en exécuter les réplications nécessaires, permet ainsi déjà de vérifier que les modifications apportées dans les valeurs de paramètre ou dans les mécanismes n'ont pas entraîné l'apparition de bugs ou d'incohérences immédiatement visibles.

Nous avons donc choisi de développer une interface graphique, très sommaire mais permettant des allers-retours rapides entre l'implémentation et l'exécution, au sein de l'implémentation de SimFeodal. Cette interface n'affiche qu'un nombre réduit d'indicateurs (figure 5.1), ainsi qu'une représentation cartographique (figure 5.2) utile à une analyse rapide du comportement d'ensemble du modèle.

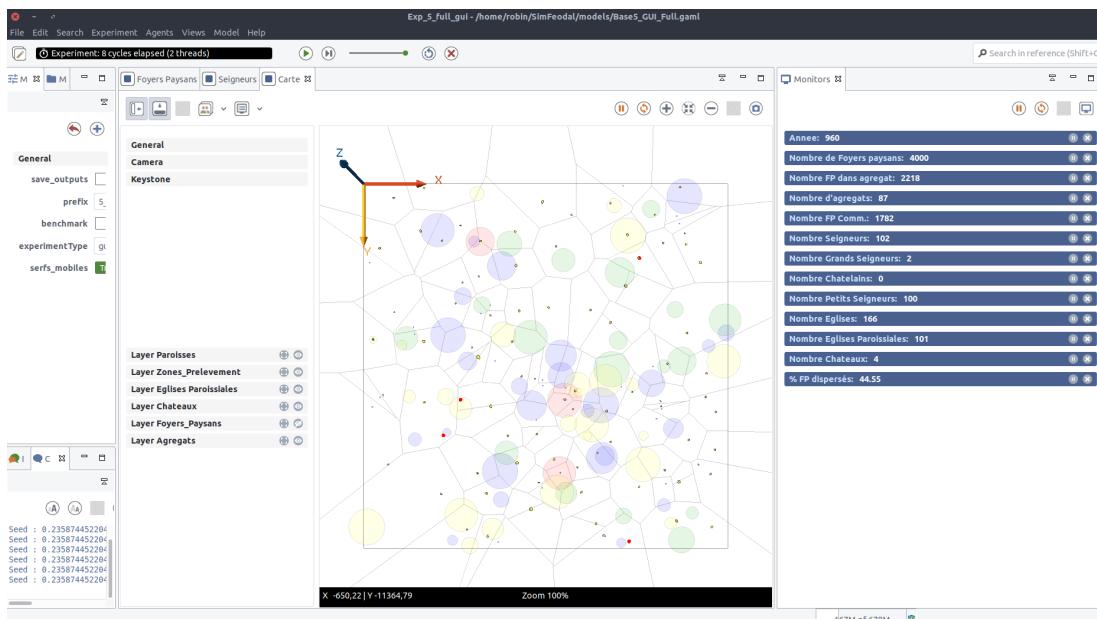


FIGURE 5.2 – Visualisation intégrée à l'interface graphique interne de SimFeodal : cartographie synthétique de l'espace modélisé.

Ces indicateurs intégrés à l'interface graphique interne de SimFeodal permettent de mener une étape préalable à l'évaluation du modèle. Cette étape vise à effectuer un premier filtrage des simulations avant d'exécuter les expériences en elles-mêmes. L'ajout de cette interface graphique vient donc renforcer l'outil d'évaluation de SimFeodal. A cette étape, il manque encore un outil véritablement adapté à l'analyse conjointe des réplications du modèle, a posteriori de l'exécution des nombreuses réplications.

5.2.2 Générer les indicateurs

La production des indicateurs doit nécessairement être réalisée en aval de l'exécution des simulations – « *offline* » dans GRIGNARD et DROGOUL (2017). Il faut pour cela disposer d'outils adaptés au traitement des données produites, c'est-à-dire répondant aux contraintes identifiées auparavant (sous-section 5.1.4).

La contrainte principale est d'être en mesure de gérer la masse de données produites. On l'a vu, cela élimine d'office les outils de type tableurs, ou encore les outils de manipulation graphique de données les plus courants. Pour les raisons évoquées dans le chapitre 1 (**Positionnement : pourquoi utiliser des outils libres ?**), seules les solutions techniques libres étaient envisageables.

Interfaces graphiques (GUI) ou en lignes de commande (CLI) Certains outils graphiques (*GUI – Graphical User Interface*), basés sur des logiciels libres en arrière-plan (PSPP, R Commander, Orange), sont extrêmement aisés à prendre en main et auraient pu constituer un bon choix. Pourtant, avec une trentaine d'indicateurs à produire pour chaque expérience, donc de manière régulière, nous avons préféré nous tourner vers des outils plus orientés vers une interface en ligne de commande (*Command Line Interface*, abrégés *CLI*).

L'utilisation de *CLI* a plusieurs intérêts gravitant autour de la reproductibilité des traitements. En premier lieu, ils permettent une adaptation aisée et rapide aux différents jeux de données. Ainsi, partant du principe que les données générées par les réPLICATIONS et expérIMENTATIONS sont de même structures, il suffit généralement de modifier le chemin d'entrée des fichiers résultants pour reproduire à l'identique une analyse sur un nouveau jeu de données.

De manière plus technique, on peut remarquer que les différents indicateurs de sortie de simulation choisis présentent souvent des caractéristiques communes, aussi bien dans le traitement nécessaire que dans les formats (graphiques) produits.

Des outils CLI pour l'analyse de données. Par exemple, la grande majorité des indicateurs reposent sur une première agrégation des données par réPLICATION et pas de temps simulé, puis par une seconde agrégation montrant la variabilité des situations générées, au niveau de l'expérIMENTATION¹⁷. En terme de manipulation de données, seuls le calcul de la variable à mobiliser, et éventuellement l'agent caractérisé sont ainsi à adapter dans ces nombreux indicateurs de sortie. La variabilité du nombre de foyers paysans et la variabilité du nombre d'agrégats ne diffèrent que par le type d'agent sur lequel le calcul est effectué par exemple. Les variations, en terme de code-sources, sont donc le plus souvent des adaptations minimes (nom de l'agent, type d'agrégation...). Le recours à des traitements en *CLI* permet ainsi un simple copier/coller, voir la création de fonctions dédiées, pour effectuer ces traitements très récurrents.

Des outils CLI pour la visualisation. Au niveau des sorties graphiques, on peut aussi remarquer que la structure des graphiques, en elle-même, est assez largement identique : on représente les pas des temps (les années simulées) en abscisse, un indicateur statistique en ordonnée, et la variabilité sous la

17. On peut considérer ces agrégations comme une succession d'opération imbriquées : pour montrer l'évolution d'un indicateur tel que le taux de foyers paysans dispersés au cours du temps simulé, il faut (1) calculer le ratio entre nombre de foyers paysans dispersés et nombre total de foyers paysans, (2) pour chacun des pas de temps simulé, (3) pour chaque simulation, (4) pour l'ensemble des réPLICATIONS d'une expérience, (5) éventuellement pour chacune des expÉRIENCES d'une phase plus large d'expérIMENTATION qui ferait varier des valeurs de paramètres.

forme de *box-plot* minimalistes (« *minimal boxplot* », promus par Edward Tufte pour minimiser le ratio données-encre (TUFTE 2001, p. 123-125)). En disposant d'un environnement de type *CLI*, et qui plus est en faisant usage de solutions graphiques construites sur une syntaxe régulière et générique (voir Fluidifier les étapes de rendu : le « pipeline de visualisation », section 5.4.2.1), il devient très confortable de générer les différents indicateurs de sortie souhaités, puisqu'il suffit d'adapter les graphiques déjà conçus.

Avec ces solutions logicielles d'analyse de données et de visualisation, il est facile de concevoir et d'implémenter les codes informatiques nécessaires à la génération des indicateurs de sortie de simulation. De plus, l'exécution de ces programmes est extrêmement rapide : les différents fichiers de sortie de simulation sont lus et parcourus une unique fois pour en tirer toutes les variables nécessaires à l'établissement des indicateurs.

En ayant choisi de mener une évaluation *a posteriori* – plutôt qu'en direct – basée sur l'observation d'indicateurs générés – par des outils adaptés au traitement de données massives – de manière automatisée, on dispose donc, pour chaque expérience, d'un ensemble de fichiers numériques : chacun des indicateurs de sortie est contenu dans un fichier unique, dans un format facilement exploitable et ré-utilisable.

5.2.3 Organiser les indicateurs en rapports paramétrables

Du point de vue de la manipulation, la création de fichiers informatiques indépendants correspondant aux différents indicateurs de sortie de simulation est extrêmement pratique : on peut facilement les identifier, les transférer et les adapter, par exemple pour en rendre le contenu plus compréhensible par un public différent.

En revanche, du point de vue de la comparaison des résultats, cette forme n'est pas la plus adaptée. Si l'on peut facilement comparer un même indicateur portant sur deux expériences différentes, la tâche se complique quand il s'agit d'avoir une vision globale des différences dans les indicateurs entre deux expériences. Pour cela, la démultiplication des fichiers correspondant aux indicateurs se révèle rapidement être un obstacle : l'utilisateur est en effet amené à jongler entre de très nombreux fichiers.

Les rapports comme instruments de comparaison. Pour faciliter la comparaison d'indicateurs multiples – et d'une forte diversité –, il est nécessaire de les organiser au sein d'une structure englobante. Nous entendons ici par organisation, une présentation structurée, suivant un certain ordre, identique selon les expériences, adaptée à une évaluation des résultats. Pour cela, nous avons choisi d'organiser les indicateurs de sortie de simulation au sein de « rapports ». Cela permet, même en présence de nombreuses expériences, de rassembler l'ensemble des indicateurs de sortie propres à chacune dans un unique fichier, à la structure toujours similaire. Un premier apport, majeur, concerne l'archivage des sorties de simulation. Avec des rapports comprenant l'ensemble des indicateurs de sortie de chaque expérience d'un modèle, il est

ainsi simple de conserver des traces de l'ensemble des versions et sous-version d'un modèle. Cela permet de garantir une certaine pérennité à ce modèle, à sa documentation, et ainsi simplifie le travail rétrospectif de caractérisation de l'évolution d'un modèle.

L'intérêt majeur de la structuration en rapports est surtout de faciliter la comparaison des expériences, c'est-à-dire des indicateurs de sortie des différentes expériences. On peut ainsi, par exemple, placer côte à côte, visuellement, deux rapports rendant compte de deux expériences différentes, et, en les faisant défiler simultanément, comparer point par point, c'est-à-dire indicateur par indicateur, leurs résultats respectifs, de manière visuelle et intuitive.

Les formes que peuvent prendre des rapports, tout autant que les modalités de leur production, sont multiples et extrêmement diverses. La forme la plus simple et courante consiste à produire manuellement le rapport en insérant les indicateurs adaptés au fur et à mesure, par exemple dans un traitement de texte. A l'opposé, on peut noter les possibilités de créations entièrement automatisées de rapports complets, comprenant par exemple des descriptions et commentaires textuels générés à la volée, en fonction d'expressions conditionnelles¹⁸.

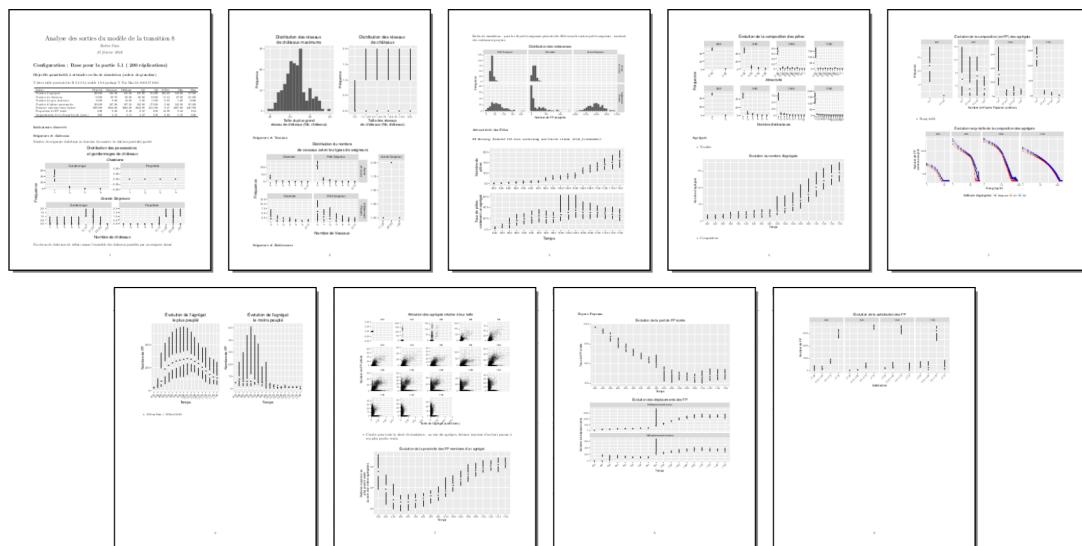


FIGURE 5.3 – Un exemple, miniaturisé, de rapport automatique généré pour une expérimentation (étape 0) de SimFeodal.

Pour SimFeodal, nous avons choisi de restreindre au maximum la manipulation manuelle. On souhaitait générer un rapport entièrement automatique, ne requérant pas d'action spécifique en dehors du choix des données depuis lesquelles créer les indicateurs. Nous n'avons toutefois pas voulu pousser l'automatisation jusqu'à l'ajout de commentaires automatiques des indicateurs de sortie : la richesse – et la difficulté – d'une approche interdisciplinaire telle que la notre est constituée par la multiplication des analyses et points de vue. Il n'y avait donc aucun besoin de générer des annotations standardisés et automa-

18. Voir par exemple l'application « SOFIE » du Commissariat général à l'égalité des territoires (CGET), qui génère automatiquement des commentaires relatifs aux inégalités femmes/hommes dans l'accès à l'emploi. Les commentaires propres aux types d'inégalités majeures de chaque EPCI sont produits de manière automatique depuis les données. <http://outils.observatoire-des-territoires.gouv.fr/sofie/>

tiques, forcément moins aboutis que les analyses de chacun des co-concepteurs du modèle. Le rapport produit (figure 5.3) n'intègre donc que les indicateurs, sous forme de tableaux et de graphiques. Ces indicateurs sont organisés par partie, en l'occurrence en fonction du type d'entités et de comportement qu'ils décrivent.

Structurer des rapports pour aller vers la reproductibilité des analyses. On a donc fait le choix de se baser sur des rapports automatisés et minimalistes, ne contenant que les indicateurs dans une forme structurée. Ce choix s'appuie sur des raisons multiples, qui ont toutes en commun une recherche de reproductibilité des résultats et des analyses menées. Une reproductibilité théorique ([encore une ref au positionnement](#)), puisque les résultats de simulation doivent pouvoir être analysés et reproduits par des chercheurs potentiellement intéressés. Mais cette recherche de reproductibilité est aussi pratique, rendue aussi nécessaire par les méthodes de modélisation suivies. Tel qu'explicité auparavant (sections 5.1.2 et 5.1.3), celles-ci s'appuient sur de nombreux allers-retours, ce qui requiert une capacité constante à reproduire et à affiner des résultats déjà observés.

La quantité d'expériences requises pour arriver à un état satisfaisant du modèle est tributaire de ces allers-retours, et le nombre de rapports qu'il faut pouvoir produire est important. La fréquence de production de ces rapports est forte, et le modélisateur a alors tout intérêt à en fluidifier et accélérer le processus de création.

Dans une telle situation, la création d'un rapport automatisé garantit une calcul et une production simplifié et rapide des indicateurs sur les nouvelles données. Cela permet un examen des sorties de simulation presque immédiatement après leur exécution. Cette automatisation permet aussi de mener une seconde évaluation – après le pré-filtrage constitué par l'observation d'indicateurs en direct – du bon déroulement « interne »¹⁹. Le caractère fixe d'un rapport automatisé se base ainsi sur une structure de données contraignante, par exemple constitués en n fichiers dotés de plusieurs colonnes spécifiquement attendues. Les caractéristiques de ces données sont elles-mêmes contraignantes. Un rapport automatisé ne fonctionne, par exemple, qu'en présence d'un nombre pré-défini de réplications complètes. En l'absence d'un de ces critères dans des données en sortie de simulation, le rapport ne peut être généré et émet une erreur. Par exemple, si le nombre de réplications est plus faible qu'attendu, ou encore si tel attribut d'un agent a changé de type informatique, la création du rapport échoue. La présence ou non de cette erreur constitue donc un nouveau filtre de vérification de la validité du modèle. Cela permet, là encore, de détecter des simulations qui présenteraient des comportements incomplets ou aberrants en terme de production de données.

Un autre intérêt majeur des rapports, déjà pointé en avantage des outils de type *CLI* est leur adaptabilité. On a vu ([chap. 3](#)) que les indicateurs à examiner sont nombreux et surtout, évolutifs, dans le sens où ces indicateurs ont

19. Au sens de l'évaluation interne, c'est-à-dire du bon fonctionnement, exempt de bugs, du modèle de simulation implémenté. Voir [ref chap 3](#).

fortement été modifiés, remplacés, affinés, au cours des étapes de paramétrage de SimFeodal. L'utilisation de rapports automatiques permet de minimiser le nombre de modifications à effectuer en cas de changements d'indicateurs. Le programme informatique qui génère les rapports s'appuie ainsi sur un code-source unique, générique aux simulations de chaque modèle. Lors d'un changement d'indicateurs, il suffit alors de modifier ce code-source en une seule place, et tous les appels à ce programme seront alors modifiés en conséquence. À partir de là, pour mettre à jour l'ensemble des rapports déjà produits, c'est-à-dire regroupant les indicateurs de chacune des expériences passées, il suffit de ré-exécuter la routine de production des rapports.

Dans le cas de SimFeodal, caractérisé par de fréquents changements dans la forme et le calcul des indicateurs, cela a représenté un gain de temps et d'efficacité très conséquent. Par exemple, lors de certaines phases de paramétrage, on pouvait être amenés à faire évoluer le modèle quotidiennement et à tester, à cette même fréquence, plusieurs jeux de paramètres. Il fallait donc analyser les résultats de plusieurs expériences chaque jour, et régulièrement ajouter des indicateurs graphiques afin d'affiner l'évaluation. Ces indicateurs devaient aussi être ajoutés aux expériences des jours précédents, et au final, on re-générait parfois jusqu'à une plus d'une dizaine de rapports sur des cycles temporels courts de quelques jours.

Par extension, cette même démarche d'automatisation, basée sur l'utilisation d'outils de type *CLI*, devrait pouvoir s'appliquer à l'identique, avec les mêmes avantages, dans le cadre plus large de l'évaluation visuelle de modèles (ref chap 3, section 3.1.4).

Dépasser les limites de la compatibilité d'ensemble. La reproductibilité, de manière générale, est plus une démarche qu'un état final : on peut toujours trouver un nouvel élément à « rendre reproductible » dans un travail (cf. chapitre 1, partie sur reproductibilité recherchée). Dans le cas des rapports automatiques, la reproductibilité recherchée doit permettre de reproduire les analyses menées – le calcul et la représentation des indicateurs de sortie – sur les jeux de données issus des différentes versions du modèle.

Comme explicité dans l'**encadré 3.2, chap 3** sur l'incrémentalité des indicateurs, une limite forte empêche d'atteindre une reproductibilité absolue des analyses du comportement des différentes versions de SimFeodal. Les données générées par les différentes versions du modèle ne sont en effet pas systématiquement « compatibles ». On entend par là qu'elles ne présentent pas toute exactement la même structure, à commencer par les variables enregistrées. Quand bien même il aurait été choisi dès le départ d'enregistrer le plus de sorties possibles, la reproductibilité de l'analyse échoue sur les données produites par le modèle et ses nombreuses versions : le modèle évolue, et avec lui, certaines variables apparaissent et d'autres deviennent caduques. La structure contraignante et précise des données nécessaires à la génération des rapports ne peut être entièrement satisfaite. La prise en compte de l'évolution du modèle demande une adaptation régulière – mais aussi rare que possible – des programmes qui génèrent ces rapports.

On ne peut donc satisfaire globalement à un objectif de reproductibilité, mais il est toutefois possible de limiter la déviance à cette ambition. Pour cela, on peut agencer les différentes versions du modèles au sein de « générations » de modèle, c'est-à-dire d'ensembles de versions présentant des attributs comparables et générant des données de même structure. Plutôt que d'adapter le code-source des rapports à chaque nouvelle version du modèle, ou encore de ne jamais l'adapter et donc d'être tributaire de la structure des toutes premières versions du modèle, cela constitue un choix intermédiaire qui permet de limiter le nombre de variantes de rapports. Cette approche suit les grandes lignes du développement logiciel général. Les itérations successives d'un logiciel sont constituées de versions « majeures » – les générations de modèles dans notre cas –, qui n'assurent pas nécessairement de compatibilité avec les versions majeures précédentes, et de versions « mineures », dans lesquelles la compatibilité est assurée²⁰.

Pour revenir aux rapports voués à l'évaluation d'un modèle, en inscrivant les différentes versions du modèle – et des programmes générant les rapport correspondant – dans des sous-ensemble de versions, les « générations », les différents rapports peuvent être considérés comme reproductibles et automatiques au sein de ces générations. Pour SimFeodal, cela implique d'organiser les différentes versions du modèle – résultant des étapes de paramétrage, cf. chap4 – au sein de grandes générations, à chaque changements structurels des mécanismes ou données produites par le modèle (voir chapitre 4, tableau des versions et sous-versions).

Les rapports, des instruments suffisants ? A l'issue de la conception et de l'implémentation de ces rapports automatiques, on dispose donc, pour chaque expérience, d'un document aisément partageable et lisible. Ces documents s'enrichissent, au fur et à mesure des générations de modèles, de nouveaux indicateurs, et sont comparables au sein de ces générations. Cela pourrait constituer la dernière étape de la création d'outils d'évaluation d'un modèle, dans la limite d'un nombre de versions ou de génération de modèles assez restreint.

SimFeodal, comme c'est souvent le cas dans les modèles à base d'agent, a toutefois été caractérisé par une forte quantité d'allers-retours entre le modèle et ses résultats, entraînant à chaque fois de nouvelles expérimentations (cf. section 5.1).

On a vu que la manipulation d'un grand nombre d'indicateurs, même pour une quantité restreinte d'expériences, disqualifiait l'usage de fichiers individuels et poussait à l'usage de rapports structurés. Avec un grand nombre d'expériences, les mêmes limites apparaissent pour les rapports : la masse d'expériences rend partiellement caduque l'utilisation unique des rapports automatiques. Il est en effet aisé de comparer, sur un même écran d'ordinateur, deux ou trois rapports, mais dès lors qu'il faut en comparer un plus grand nombre, la

20. Par exemple, un fichier de dessin vectoriel créé avec le logiciel Adobe Illustrator 15.0 ne sera pas lu correctement avec une version 14.0. Ce fichier présentera toutefois un compatibilité parfaite avec les versions 15.1 à 15.n du logiciel.

manipulation conjointe des rapports devient complexe, tout autant que d'avoir une vision globale des résultats principaux de chaque expérience.

5.2.4 Organiser les rapports : les *dashboards*

Pour être en mesure de comparer de nombreux éléments, il est nécessaire de passer d'une exploration linéaire, fondée sur le visualisation successive de chacun des indicateurs, à une exploration globale et interactive. En pratique, plutôt que de faire défiler visuellement les nombreuses pages d'indicateurs, mieux vaut une interface présentant les points clefs de l'évaluation et qui permette d'entrer dans le détail de chacun des indicateurs dans un second temps, sur demande. Comme le résume le « mantra » de l'analyse visuelle (« *Visual information-seeking mantra* ») de Ben SHNEIDERMAN :

« Overview first, zoom and filter, then details on demand »

SHNEIDERMAN 1996, p. 2

5.2.4.1 Les *dashboards*

Cette logique, assez universelle désormais, est celle qui préside à la création des nombreux « tableaux de bord », ou « *dashboards* » que l'ont voit émerger depuis la fin des années 1990. Rob Kitchin et ses co-auteurs définissent ainsi les *dashboards*, en s'appuyant sur les travaux de FEW notamment :

« For Few [(FEW 2006a, p.34)] a ‘dashboard is a visual display of the most important information needed to achieve one or more objectives; consolidated and arranged on a single screen so the information can be monitored at a glance’. Just as a car dashboard provides critical information needed to operate the vehicle at a glance, indicator dashboards provide key information for running companies or cities (Dubriwny & Rivard, 2004 [RIVARD et COGSWELL 2004]). »

KITCHIN, LAURIAULT et MCARDLE 2015, p. 11

Très répandus dans le monde de l'informatique décisionnelle (*Business Intelligence, BI*), ces outils permettent d'explorer des données d'entreprises, par exemple des résultats financiers. Pour ce faire, ils mettent en avant, dans une interface unique, des indicateurs clés (*Key Performance Indicators, KPI*), qu'il est ensuite possible de filtrer et d'affiner, par exemple par sélection de différents intervalles temporels.

Les *KPI* jouent le rôle d'indicateurs synthétiques, c'est-à-dire qu'ils s'adressent à des gestionnaires, par exemple des *managers*, qui ont une expertise importante sur les résultats produits. Les utilisateurs des *dashboards* ne sont donc pas des analystes, à même d'explorer eux-mêmes les données mobilisées, mais plutôt des thématiciens qui se fondent sur les indicateurs présentés pour prendre des décisions.

La dichotomie « analyste/décisionnaire » s'exprime aussi dans le domaine de la recherche, et notamment dans la recherche en géographie urbaine à visée

applicative. Avec l'avènement des données massives et de leur prise en compte pour la gestion des villes (*smart cities*), les géographes se sont aussi penchés sur des outils de ce type (LAURINI 2018). En résulte une utilisation de plus en plus fréquente de *dashboards* en géographie urbaine (« *city-dashboards* », ROUMPANI, O'BRIEN et HUDSON-SMITH 2013; KITCHIN, LAURIAULT et MCARDLE 2015; BATTY 2015).

Le parallèle avec le monde de l'informatique décisionnelle est en effet présent dans les types d'utilisateurs et de producteurs de ces outils. Il s'agit de mettre à disposition d'experts thématiques (les décideurs publics) des indicateurs clés, issus de calculs parfois complexes. Cela afin de leur permettre d'évaluer une situation donnée et de prendre les décisions politiques adéquates.

Le constat ayant mené à l'apparition des premiers *dashboards*, tant en informatique décisionnelle qu'en géographie urbaine, est identique. Les informations nécessaires à l'évaluation d'une situation (financière, relative aux politiques publiques...) sont de plus en plus nombreuses et hétérogènes. Les indicateurs permettant de mener ces évaluations, pensés pour les décideurs qui en feront usage (*managers*, acteurs publics...), se démultiplient et se diversifient aussi par conséquence.

Inspiré autant par l'usage *BI* que par l'usage géographique, nous considérons que ces outils peuvent se révéler utiles dans l'évaluation de modèles de simulations complexes. Les enjeux sont en effet les mêmes : permettre à des thématiciens de comprendre et d'évaluer les sorties d'un modèle, à l'aide d'indicateurs nombreux et complexes présentés de manière transparente relativement à cette complexité.

Ce positionnement méthodologique s'inscrit pleinement dans la démarche de co-construction interdisciplinaire de SimFeodal. On y retrouve ainsi la même logique qui anime les dashboards : une évaluation menée par des thématiciens qui s'appuient pour cela sur des indicateurs clefs (ref. aux indicateurs les plus importants dans le chap 3) et précisent leur analyse à l'aide d'indicateurs secondaires présentés sous forme d'un panel varié de visualisations. Nous avons donc choisi de ré-organiser les rapports initialement produits pour leur donner une forme plus adaptée à ces enjeux, sous forme de *dashboards*.

5.2.4.2 SimVADB

Les *dashboards* font souvent usages de représentations graphiques très métaphoriques des tableaux de bord automobiles. On y retrouve fréquemment une forte mise en valeur d'indicateurs numériques simples au travers de représentations « skeuomorphes », c'est-à-dire qui reprennent l'apparence physique des objets symbolisés²¹. On retrouve communément, par exemple, des indicateurs représentés sous forme de jauge (*gauge charts*), de thermomètres (*thermometer charts*), ou encore de voyants d'alerte et autres témoins lumineux (figure 5.4)).

21. Voir par exemple la page Wikipédia consacrée : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Skeuomorphisme>

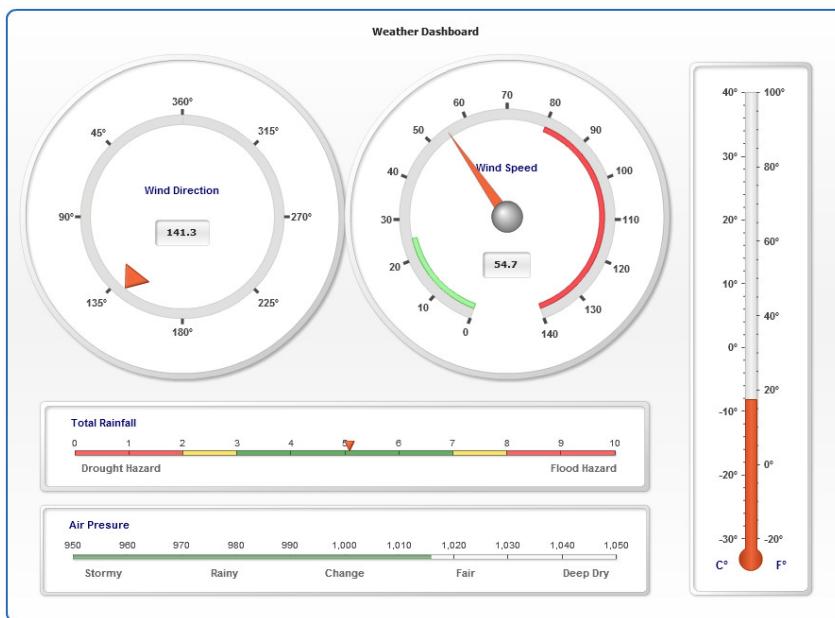


FIGURE 5.4 – Un exemple de représentations visuelles courantes dans les dashboards.
Tiré de PANDRE (2011)

Pour SimFeodal, les indicateurs étant assez fortement conçus et structurés (chap. 3), nous n'avons pas ressenti le besoin de faire appel à ce type de représentation. Nous avons donc emprunté aux dashboards la logique d'organisation visuelle des indicateurs plutôt que les modes de visualisation en eux-mêmes. Pour faciliter la transition pour l'utilisateur, on cherchait ainsi à produire un dashboard au plus proche, visuellement, des rapports automatiques qui les précédait.

On a pour cela développé un dashboard adapté à SimFeodal, nommé SimVADB²². Dans un premier temps, on souhaitait simplement ré-organiser le code-source produisant les rapports automatiques, afin de convertir ces rapports en dashboards. Cela a été effectué au moyen d'outils permettant de générer des applications en ligne, sans changer de langage de programmation. Dans ce cas, on s'est appuyé sur la librairie logicielle Flexdashboard (IANNONE, ALLAIRE et BORGES 2018).

Le passage du rapport automatique au dashboard illustre l'un des grands intérêts des outils de type CLI : dans le cas de SimVADB, il a suffit de ré-organiser le code, sans modifier à aucun moment les fonctions de calcul et de création des indicateurs de sortie de simulation. Les codes 5.1 et 5.2 illustrent la facilité de cette modification. Il s'agit véritablement de placer les différentes fonctions dans des blocs graphiques. Ces modifications minimes augmentent toutefois considérablement la convivialité et la facilité de l'analyse de résultats de sortie d'un modèle.

22. Simulation Visual Analysis DashBoard.

Cette application a rapidement été remplacée par l'itération suivante (SimEDB, voir section 5.2.5), et n'a donc dans les faits jamais été complètement finalisée. On en trouve une trace, fonctionnelle mais incomplète (les versions ultérieures n'ont pas été enregistrées dans l'outil de versionnement), dans ce dépôt logiciel : <https://github.com/RCura/SimEDB/tree/2cd22c7c>

```
# Agent de type A
afficher('Agent de type A')

print('Indicateur 1')
calcul_indicateur_1 {...}
affichage_indicateur_1 {...}

afficher('Indicateur 2')
calcul_indicateur_2 {...}
affichage_indicateur_2 {...}

# Agent de type B
afficher('Agent de type B')
[...]
```

CODE 5.1 – Pseudo-code du rapport automatique.

```
onglet{titre = 'Agent de type A',
sous_onglet{titre = 'Indicateur 1',
calcul_indicateur_1 {...}
affichage_indicateur_1 {...}
},
sous_onglet{titre = 'Indicateur 2',
calcul_indicateur_2 {...}
affichage_indicateur_2 {...}
}
},
onglet{titre = 'Agent de type B',
[...]
}
```

CODE 5.2 – Pseudo-code du dashboard.

Comme dans l'exemple de code, on a préféré organiser les indicateurs au seins d'onglets plutôt que de les présenter dans des pages successives. Les onglets de premier niveau représentaient les types d'agent, et des onglets de second niveau permettaient de visualiser l'ensemble des indicateurs associés à ces agents (figure 5.5).

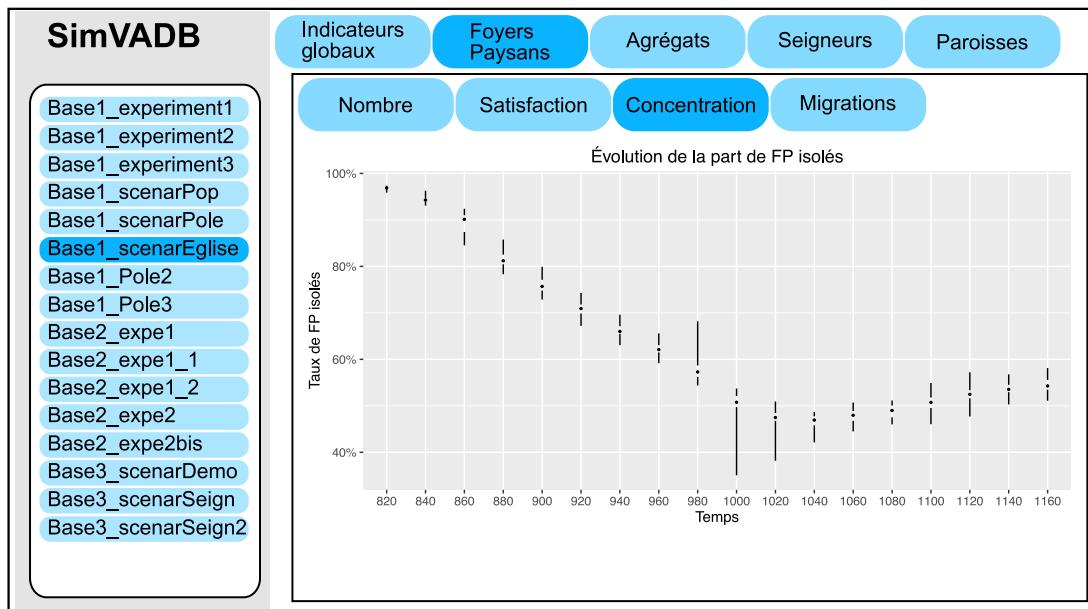


FIGURE 5.5 – Un *mock-up*²³ de la première interface de SimVADB, un *dashboard* dédié à la visualisation des indicateurs de sorties de simulation de SimFeodal.

Au niveau de l'interface utilisateur, SimVADB permettait de choisir, via un menu de sélection (partie de gauche dans la figure 5.5), les expériences passées dont on voulait visualiser les indicateurs de sortie (les deux niveaux d'onglets de la partie de droite).

Les limites du dashboard. Avec la multiplication des valeurs de paramètres testées, il est devenu plus efficace de regrouper les expériences au sein d'expérimentations. Celles-ci voient varier plusieurs paramètres, potentiellement avec de multiples valeurs de paramètres pour chacun. Elles constituent

23. Un *mock-up* est une « maquette à l'échelle », ou un prototype, permettant de représenter une interface graphique de manière schématique.

donc un ensemble d'expériences qui partagent des mécanismes et un jeu de paramètre par défaut communs.

Une interaction trop simple. Avec le mode de sélection choisi dans SimVADB, basé sur le nom des expériences, il devenait plus difficile de sélectionner rapidement des ensembles d'expériences membres d'une même phase d'expérimentation (cf. [tableau versions et sous-version, chap 4](#)). En effet, et comme illustré dans la figure 5.5, les noms d'expériences tendent à s'allonger, et avec leur masse augmentant, il est peu commode d'avoir à parcourir tout un long menu de sélection pour trouver les expériences souhaitées. De plus, malgré des tentatives de nommage régulières et explicites, la multiplication des expériences et expérimentations implique aussi une certaine confusion dans les types de mécanismes et valeurs de paramètres associés. Sans table de correspondance complète entre les noms des expériences et leurs valeurs de paramètres, il devenait impraticable de retrouver les différentes expériences mettant en avant, par exemple, des attractivités fortes par les pôles, une plus forte hiérarchisation des attracteurs ou encore des migrations lointaines facilitées. Le choix méthodologique d'interaction avec la plate-forme d'affichage des indicateurs, basé sur une sélection des expériences depuis leur nom, s'est donc révélé inadapté à la sélection et à l'exploration des sorties de SimFeodal.

Dépasser le « présentoir » de données. Au delà du souci du mode d'interaction, qui aurait pu être amélioré, un autre problème apparaissait. Pour évaluer visuellement différentes configurations du modèle, on ne pouvait se contenter d'un simple affichage des données, au sein d'un outil de type présentoir interactif tel que SimVADB. Comme dit dans [le chapitre 4](#), le paramétrage de SimFeodal a ainsi reposé sur de nombreuses étapes d'évaluation des différentes version du modèle. L'approche d'analyse principale était donc la comparaison, point par point, entre les résultats des indicateurs de sortie de simulation des versions successives de SimFeodal. Un outil de présentation dynamique de résultats de sorties de simulations est certes plus adapté qu'un rapport statique, mais il ne constitue pas pour autant un outil adapté à la comparaison. S'il suffit pour de la restitution, par exemple dans le cadre du rapport systématique des résultats de SimFeodal, on ne peut s'appuyer uniquement sur une succession d'évaluations visuelles pour appréhender l'étendue des changements apportées par une modification des valeurs de paramètres.

5.2.5 Interagir avec les rapports : exploration interactive

Face à la démultiplication des expérimentations, consécutive aux nombreuses étapes de paramétrage de SimFeodal ([cf. chap 4](#)), il a fallu repenser la plate-forme d'évaluation des résultats. Pour cela, considérant que les simulations ne pouvaient être aisément appréhendées et sélectionnées par leur nom, numéro d'étape ou de version, il a été décidé d'adopter une posture plus proche de l'exploration du modèle en elle-même. C'est-à-dire de ne pas caractériser les simulations par un identifiant quelconque, mais plutôt par leur spécificité in-

trinsèque, c'est-à-dire la combinaison de valeurs de paramètres qui les rendent uniques. Ce faisant, au sein de la plate-forme d'exploration SimVADB, l'enjeu devenait plutôt la compréhension des effets des valeurs de paramètres sur les indicateurs que l'évaluation d'une simulation en particulier. Il fallait passer du descriptif, quelle qu'en soit la méthode, à du comparatif.

Du point de vue de l'interface utilisateur, cela implique que la sélection ne se fasse plus par un unique critère (le nom de la simulation), mais au contraire sur du multi-critère. Par une succession de sélections, chaque paramètre pouvait constituer un nouveau filtre dans lequel on avait à choisir les valeurs à interroger (voir la figure 5.6 (E) de l'encadré 5.1).

La quantité de paramètres en entrée était importante et pouvait dès lors donner lieu à un mode de sélection complexe et fastidieux – définir une par une les valeurs voulues pour chacun des 45 paramètres –. Nous avons choisi encore une fois de nous appuyer sur l'aspect visuel afin de permettre aux utilisateurs de SimVADB de choisir la ou les expérimentations à analyser.

Visualiser avec des coordonnées parallèles. Pour cela, on a choisi de représenter les combinaisons de paramètres dans un graphique en « coordonnées parallèles » (*parallel coordinates*, d'après INSELBERG et DIMSDALE 1987, voir FEW 2006b par exemple pour une description plus succincte, illustrée et pratique). Ce type de graphique est en effet extrêmement pertinent pour représenter une information multi-dimensionnelle en ce qu'il permet de détecter graphiquement des *clusters* d'individus statistiques²⁴ (HEINRICH et WEISKOPF 2013, p. 2), c'est-à-dire de faire ressortir visuellement les expériences dont les valeurs de paramètre sont proches. Notons bien que l'on parle ici des valeurs de paramètres, c'est-à-dire des conditions des expériences, et non des indicateurs de sortie. L'approche va ainsi des paramètres aux résultats : depuis des valeurs de paramètres choisies, on analyse la diversité des résultats.

Interagir avec des coordonnées parallèles. De plus, en matière d'interaction, on utilise fréquemment les graphiques en coordonnées parallèles en vue de filtrage. Cette opération est le plus souvent menée par des actions de *brushing* (« brossage »), c'est-à-dire de sélection graphique d'une zone en dessinant son étendue à la souris (voir encadré 5.1). Ce type de sélection se révèle en effet souvent plus efficace et intuitive qu'une sélection textuelle plus systématique :

« Filtering is an operation that removes signals from its input. A filter reduces the number of lines to be rendered. In this sense, dynamic querying [...] is a filter, if implemented with brushing [...], which reduces clutter by putting the filtered lines in focus using

24. Ici, chaque expérience est un individu statistique. Il est caractérisé par un ensemble de variables, les différents paramètres, et les modalités de ces variables que cet individu emprunte (les valeurs de paramètres). Quand le nombre d'individus est important, les différentes « courbes », qui correspondent au profil des individus sur le graphique en coordonnées parallèles, peuvent se superposer et montrer des tendances similaires. Avec ce type de représentation, il est facile de visualiser les grandes classes d'individus constituées par ces « tendances », et donc de constater des distinctions entre les individus (les expériences) de manière visuelle.

some highlighting mechanism. Combining simple brushes using logical operators [...] further allows the user to formulate rather complex queries that might even achieve faster and more accurate results using parallel coordinates than using a Structured Query Language (SQL) [...]. »

HEINRICH et WEISKOPF 2013, p. 13

Cette utilisation est courante dans les champs de la visualisation d'information (*InfoVis* et *Visual Analytics*), et en a été reprise en géographie quantitative. On la retrouve par exemple chez l'un des représentants de l'analyse spatiale des années 1990, Stewart Fotheringham. Cet auteur indique même l'usage du graphique en coordonnées parallèles en tant que filtre pour identifier des informations dans une autre dimension, spatiale ici : « the data being displayed in parallel coordinates can be linked to a map and then brushed to highlight the locations of interesting lines displayed in *m*-space on the parallel co-ordinates. » (FOTHERINGHAM 1999).

Encadré 5.1 : Construction et utilisation interactive d'un graphique en coordonnées parallèles

La figure 5.6 illustre les étapes successives de construction d'un graphique en coordonnées parallèles, depuis le tableau statistique (A) jusqu'au graphique final (D).

Pour cela, on projette les valeurs des variables sur des axes représentant chacune des variables (B). En normalisant la taille de ces axes et en les plaçant en parallèle (C), on peut alors tracer les « profils » des variables en reliant les positions de chacun des individus statistiques sur chacun des axes (D).

La seconde partie de la figure représente le mode d'interaction par *brushing* : on « brosse » sur chaque axe une sélection de valeurs à conserver (E). La sélection graphique est convertie en intervalles numériques et formalisée sous une forme classique (F) qui permet de filtrer les données sous-jacentes. Au final, cette opération renvoie le seul individu statistique répondant aux deux sélections graphiques (G).

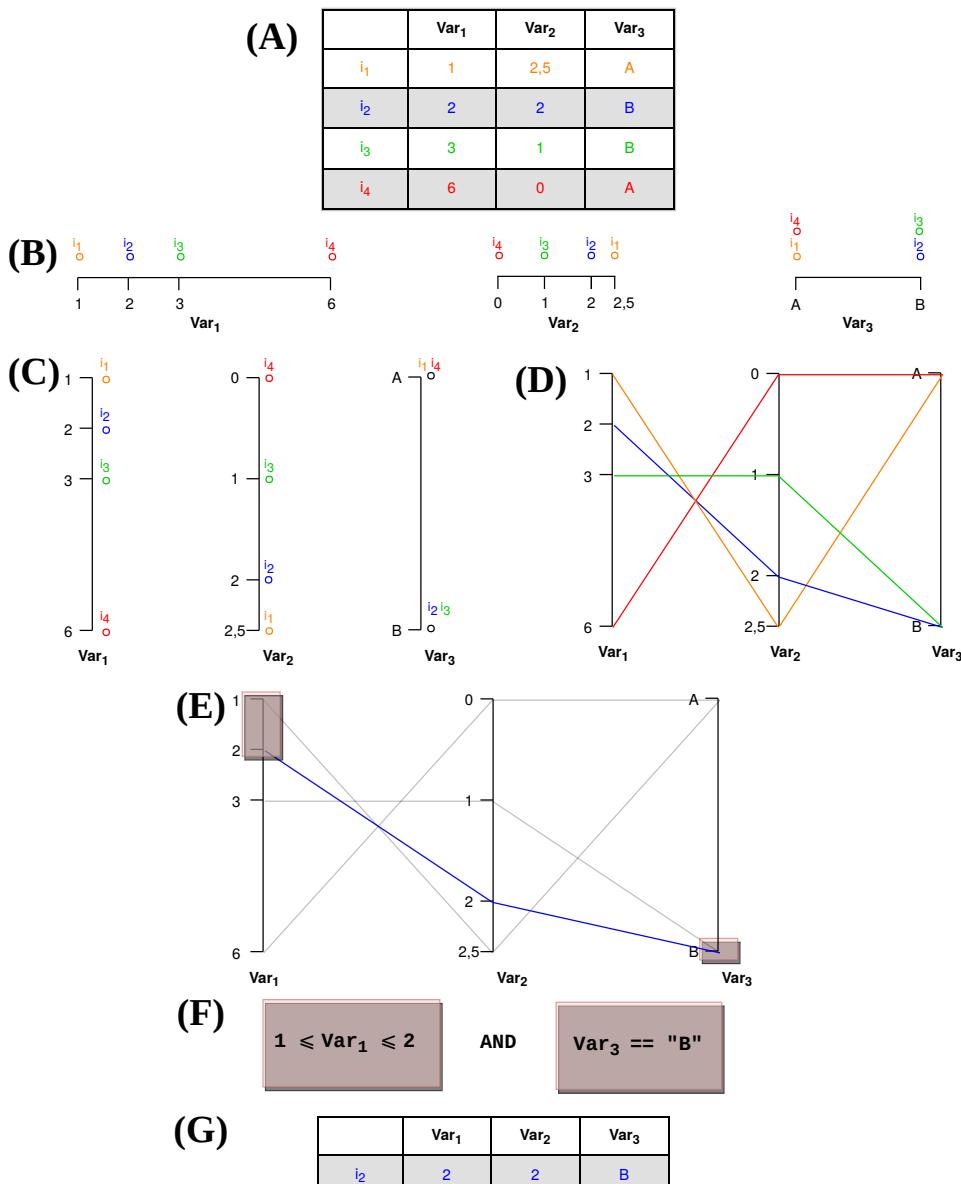


FIGURE 5.6 – Construction d'un graphique en coordonnées parallèles et sélection interactive.

Appliqué aux données de SimFeodal, cette interface (figure 5.7) se révèle particulièrement efficace pour sélectionner les configurations de paramètres à explorer. Ainsi, en « brossant » quelques filtres manuellement (figure 5.7 - A), on arrive rapidement à isoler une expérience spécifique.

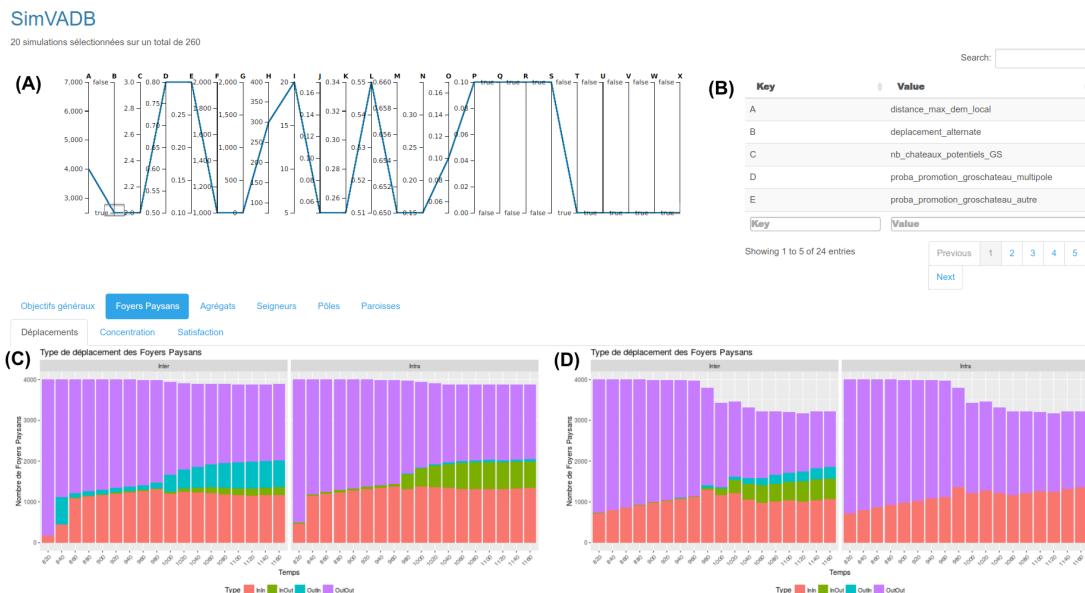


FIGURE 5.7 – SimVADB (Simulation Visual Analysis DashBoard), un *dashboard* d’exploration visuelle des indicateurs de sortie de simulation de SimFeodal.

La sélection des simulations à explorer se fait dans le graphique en coordonnées parallèles (A), en « brossant » des filtres graphiques sur les « dimensions » du graphique, dimensions dont les intitulés sont explicités dans le tableau B. Les graphiques C et D indiquent l’évolution des types de déplacements des foyers paysans au cours des simulations.

- Le graphique C représente, pour cet indicateur, une moyenne de l’ensemble des simulations intégrées dans la base de données (260 ici), recouvrant donc plusieurs valeurs de paramètres.
- Le graphique D représente cet indicateur calculé depuis un sous-ensemble de 20 simulations (donc une expérience composée de 20 réplications), pour lesquelles le paramètre « B » (*deplacement_alternate*) vaut *true*.

Afin de permettre aux utilisateurs de remarquer les particularités des simulations explorées, nous avons choisi de mettre en emphase les différences entre la tendance générale des indicateurs, en calculant des moyennes de l’ensemble des simulations (figure 5.7 - C), et les valeurs spécifiques des indicateurs de l’expérience choisie (figure 5.7 - D). Cela permet, visuellement, d’être en mesure d’évaluer les sorties de simulation d’une expérience tout en ayant un référentiel visible. Les différentes expériences produisent des résultats sensiblement similaires²⁵, et on ne peut alors plus les comprendre sans les confronter à d’autres résultats similaires. Le choix d’une agrégation de l’ensemble des simulations effectuées est discutable, en ce qu’on aurait par exemple pu plutôt isoler des simulations « de référence » afin de diminuer l’effet « d’aplatissement » engendré par l’agrégation de résultats nombreux et hétérogènes. Toutefois, la variabilité des résultats étant encore assez restreinte, au moment de la création et de l’utilisation de SimVADB, ce référentiel agrégé permettait déjà une compréhension plus fine des sorties de simulations, en particulier dans l’analyse de l’impact de variations fines de valeurs de paramètres.

25. Si chaque expérience, et chaque réplication, produisent des résultats uniques, le choix d’une évaluation par des indicateurs visuels peut prêter à confusion si l’on n’a pas de repère précis. Les critères attendus, présentés dans le chapitre 3 sont ainsi assez précis pour départager une simulation très éloignée des attentes et une autre simulation plus conforme. Pour autant, par exemple quand les valeurs de paramètres varient faiblement, les résultats produits peuvent être assez similaires dans les grandes tendances qu’ils font ressortir.

5.2.6 Explorer en comparant : la plateforme SimEDB²⁶

Après un travail de paramétrage grossier qui permet de stabiliser les mécanismes, il est souvent nécessaire de passer à une phase plus fine. On vise à ce moment à mieux calibrer un modèle à l'aide de variations de valeurs de paramètres de granularité inférieures. En vue d'évaluer les simulations, et donc de les différencier les unes des autres à l'aune des indicateurs générés, la comparaison d'une expérience spécifique avec un référentiel constitué de toutes les expériences précédentes ne permet plus de mener ce travail de comparaison fine. Les variations entre simulations sont trop fines pour être distinguables les unes des autres par le biais d'une comparaison avec un référentiel unique²⁷. Cela s'entend quelque soit la manière dont ce référentiel est constitué, qu'il résulte d'une agrégation de simulations ou encore d'une version « de base » du modèle (par exemple, dans le cas de SimFeodal, les versions principales identifiées dans le chapitre 4).

Pour pouvoir correctement évaluer les apports d'un nouveau jeu de valeurs de paramètres, et donc, dans une démarche itérative, pouvoir différencier deux expériences successives, il est nécessaire d'être en mesure de comparer directement les expériences les unes avec les autres, ou encore avec un référentiel facilement ajustable. On peut énumérer les quelques exemples de cas de figure suivants :

- Comparaison entre une expérience spécifique et une autre expérience spécifique de même « importance ». Par exemple, comparer deux expériences qui font varier légèrement différemment une valeur de paramètre.
- Comparaison entre une expérience spécifique et une autre expérience spécifique d'« importance » différente. Cette différence de niveau peut être constituée par exemple par une version « de base » que l'on comparerait à une variante de celle-ci.
- Comparaison entre deux expérimentations, par l'agrégation de leurs résultats. Si l'on a mené des expérimentations faisant varier de manière systématique deux paramètres différents, il peut être intéressant de les comparer en bloc, c'est-à-dire par exemple en prenant les moyennes de chacune des expériences composant ces expérimentations.

Ce faisant, on fait en fait varier la notion de « simulation de référence », qui peut alors revêtir plusieurs formes. Pour cela, il n'est plus possible de mener

26. La plate-forme d'exploration SimVADB (SimFeodal Visual Analysis Dashboard) a été renommée SimEDB ([...] Exploration Dashboard) par soucis de simplicité, le terme « Exploration » nous semblant plus compréhensible et explicite que celui de Visual Analysis. Ce nom apporte de plus une cohérence sémantique entre plusieurs productions de l'auteur – TimeLineEDB - (CURA 2017b) ; RoadTrafficEDB et CitiBikeEDB - (CURA 2017a). Cela inscrit cette plate-forme d'exploration de données issues de simulation dans une « famille » d'outils d'exploration de données spatio-temporelles.

27. On peut prendre l'exemple de SimFeodal. En faisant varier le nombre de foyers paysans de 4000 à 4200 (5% de variation), les résultats du modèle changent peu : de faibles variations de valeurs de paramètres entraînent le plus souvent de faibles variations dans les indicateurs de sorties observés. On peut de plus noter que les répercussions d'un changement de valeur de paramètre peuvent être très différentes de l'ordre de grandeur de ce changement de valeur. Cela s'explique par la non-linéarité de l'influence des paramètres. Dans l'exemple pris, pour ces 5% de variation dans le nombre de foyers paysans, la majorité des indicateurs variera ainsi de moins de 1%.

une comparaison visuelle entre un référentiel commun et une expérience spécifique, mais bien de baser l'évaluation sur la comparaison entre deux ensembles spécifiques qui doivent pouvoir être spécifiés. D'un point de vue méthodologique, cela requiert de pouvoir afficher conjointement les indicateurs de sorties de deux expériences (ou ensembles d'expériences). Cela implique aussi de laisser à l'utilisateur la responsabilité d'un choix supplémentaire puisqu'il faut désormais effectuer deux sélections : une pour chacun des points de comparaison. La sélection d'une expérience via l'usage de *brushing* sur un graphique en coordonnées parallèles des valeurs de paramètres ayant montré son efficacité, il a été choisi d'étendre ce principe d'interactivité au choix du référentiel.

Dans cette version remaniée de la plate-forme d'exploration (voir figure 5.8), renommée SimEDB (**Sim**Feodal Exploration DashBoard)²⁸, l'accent est mis sur la comparaison de deux ensembles de résultats, chacun répondant à une sélection propre. L'utilisateur doit ainsi « paramétrier » interactivement, via *brushing*, les expériences à afficher pour le référentiel et pour les expériences à comparer. On dispose pour cela de deux outils de filtrage des simulations (partie de gauche dans la figure 5.8), qui peuvent être utilisés de concert, pour comparaison visuelle, ou par étapes successives²⁹.

En superposant les graphiques et tableaux des indicateurs, la comparaison visuelle est facilitée. On peut alors comparer deux variations fines d'un mécanisme du modèle, en sélectionnant par exemple une unique différence dans les valeurs de paramètres du modèle (par exemple un paramètre relatif à la promotion des paroisses dans la figure 5.8). De manière générale, ce choix d'outil d'interrogation des données permet de répondre à l'ensemble des cas de figures identifiés dans les paragraphes précédents.

28. Voir la note de bas de page 26.

29. En menant par exemple une première comparaison entre une expérience « A » en haut et « B » en bas, puis en sélectionnant « C » en haut, puis « D » en bas etc. On compare ainsi A avec B, puis B avec C, et enfin C avec D.



FIGURE 5.8 – SimEDB

Nous reviendrons plus précisément et longuement sur la description de SimEDB dans les parties suivantes (section 5.4, p. 222), mais après en avoir décrit les étapes de construction et les besoins auxquelles ces évolutions répondent, il est maintenant nécessaire de revenir sur les données manipulées par cette plate-forme d'exploration. Le type, la structure et la masse de ces données (section 5.1) sont en effet indissociables des choix méthodologiques effectués pour SimEDB. Il est donc important de présenter les choix et contraintes de ces données avant d'entrer dans une description approfondie de la plate-forme.

5.3 Organiser les données

On a vu dans la première partie de ce chapitre (section 5.1) que les données produites par SimFeodal étaient nombreuses, diverses et massives. La seconde partie (section 5.2) a montré les types de problèmes que de telles données, une fois exploitées pour en tirer les indicateurs de sortie, peuvent poser en matière d'exploration.

Nous souhaitons ici revenir sur une corollaire indispensable à l'utilisation efficace de ces données. De la même manière que la multiplicité des indicateurs, des expériences et des expérimentations requiert des outils d'exploration adaptés, la multiplicité des données requiert des outils de stockage et d'interrogation eux aussi adaptés. Là encore, on peut noter une succession de contraintes liées à ces données et à leur massification, contraintes qui limitent et guident les modes d'organisation de ces données. Sans structuration adéquate, l'acquisition, l'archivage, l'interrogation ou encore la sauvegarde des données générées par le modèle ne peuvent être garantis, et encore moins de manière efficace. Le choix d'une méthode d'organisation des données en sortie de simulations ne relève donc pas d'une quelconque coquetterie technique. Au contraire, conditionne et constraint fortement aussi bien les modalités de création des indicateurs que les possibilités de la plate-forme d'exploration de les afficher de manière interactive.

5.3.1 Assurer la capacité d'interrogation des données

Avant de se soucier du « schéma » de la base de données³⁰, du choix du Système de Gestion de Base de Données (SGBD), ou encore des performances de ce dernier, il convient de se fixer sur la manière dont on souhaite entreposer les données.

De la myriade de fichiers issus de tableurs organisés dans une multitude de dossiers spécifiques à l'entrepôt de données décentralisé orienté documents, en passant par les traditionnelles bases de données relationnelles, les possibilités de stockage et d'organisation des données issues de simulations sont ainsi innombrables. Plusieurs contraintes successives permettent de limiter le choix à un sous-ensemble de solution adaptées parmi lesquelles on peut alors mener une étude plus approfondie, passant notamment par des comparaisons entre ces candidats.

Une des premières contraintes est constituée par la nécessité d'interroger fréquemment et de manière répétée les données. C'est l'une des contre-parties du passage d'un rapport automatique à un outil d'exploration interactif et dynamique (section 5.2.4). Dans un rapport automatique, on interroge une fois les données pour en tirer les indicateurs de sortie, et ceux-ci ne sont plus amenés à changer, sauf re-calculation par exemple suite à des ajouts d'indicateurs. Au

30. On utilise souvent le terme de « schéma » pour désigner la version implémentée, dans un SGBD spécifique, du Modèle Conceptuel de Données (MCD). Contrairement au MCD, qui donne une version conceptuelle et générique d'une base de données, le schéma est donc tributaire du SGBD dans lequel il est intégré.

contraire, dans un outil dynamique et interactif, les indicateurs sont calculés depuis les données « à la volée », c'est-à-dire à chaque qu'un indicateur doit être affiché. On peut mettre en place un système de cache, pour conserver les calculs déjà effectués, mais avec les dernières itérations de SimEDB où le nombre de possibilités de sélections est extrêmement important, ce n'est plus possible. Il est nécessaire de procéder aux calculs à chaque affichage des graphiques et tableaux de résultats. L'interrogation des données est donc extrêmement fréquente et répétitive. Elle doit alors être aussi simple (en termes de mode d'interrogation) qu'efficace (en termes de rapidité d'interrogation).

Dans le cadre des données issues de SimFeodal, en vue de leur mobilisation dans SimEDB, nous avons ainsi eu à sélectionner quelques SGBD candidats parmi une foule de solution possibles. Afin de guider ce choix, trois critères ont été définies, et forment, selon une hiérarchie propre à leur ordre, un ensemble de filtre ayant permis la réduction des SGBD possibles à un nombre appréciable. Ces critères, dont l'énonciation guidera cette partie, sont ainsi (1) l'universalité, ou « agnosticité », des SGBD aux outils de requête ; (2) la pérennité et stabilité des solutions disponibles et (3) les performances des SGBD considérés.

5.3.1.1 Interroger de manière universelle et indépendante

Lors de la conception d'un outil faisant appel à des données, qui plus est massives, il convient de se positionner tôt sur la manière d'interroger ces données. Par interrogation, on entend ici, comme souvent dans le domaine des bases de données, la manière de faire appel, concrètement, aux données, pour en tirer les sous-ensembles, agrégations et autres résultats synthétiques résultant du traitement des données brutes. Si l'on considère des données stockées dans un tableur, alors les « formules », les tableaux croisés dynamiques ou encore les graphiques issus du tableur sont des interrogations des données, qui s'expriment dans ce cas via un ensemble de langages, écrits – les formules, qui font appel à des fonctions spécifiques des tableurs – ou visuels – les tableaux croisés dynamiques, construits en faisant glisser des intitulés de colonnes dans un tableau.

Stockage distribué ou centralisé. Avant même de s'intéresser aux spécificités de ces langages, un premier choix réside dans le mode de stockage des données qui doivent être mis à disposition d'une plate-forme. Doit-on laisser l'utilisateur intégrer lui-même les données, et ainsi, en faire un stockage « distribué », dans le sens où chaque utilisateur de l'application possèderait physiquement une copie locale des données ? Ou, au contraire, les données doivent-elles être centralisées, c'est-à-dire enregistrées en une seule copie à laquelle les utilisateurs accèderaient à distance ? Pour reprendre l'exemple des tableurs, doit-on privilégier une solution locale – chacun ayant une copie du fichier tableur et menant ses propres modifications dessus – ou une approche de type centralisée, par exemple en privilégiant des tableurs collaboratifs en ligne (*Google Docs/Sheets* par exemple) ?

Habituellement, c'est-à-dire dans une grande majorité d'applications, les

données sont stockées localement : cela permet, en particulier, de ne pas dépendre d'une connexion internet pour interroger des données qui seraient hébergées sur internet. Dans le cas de SimFeodal, cette solution est rendue difficile, sinon impossible, par la masse de données en sortie de simulations. Si chaque utilisateur de SimEDB devait posséder une copie des données, voir plusieurs en cas d'utilisations depuis différents ordinateurs, cela occuperait plusieurs gigaoctets de données à chaque fois. De plus, en cas de mise à jour des données, c'est-à-dire d'insertions de nouvelles sorties de simulations, il faudrait distribuer à nouveau l'ensemble du jeu de données, à chaque fois.

Pour ces raisons, nous avons fait le choix d'un stockage centralisé, sous forme d'une architecture « client-serveur », hébergé sur un serveur internet dédié, ce qui permet à la plate-forme de travailler à chaque fois sur les données les plus à jour, réduit la taille du stockage physique associé, et dispense d'une configuration sur chaque poste utilisateur : si le lien entre l'application et les données fonctionne correctement pour un utilisateur, il fonctionnera à l'identique pour tous les autres. Ce choix présente un dernier avantage, non négligeable : en stockant les données en un seul lieu, c'est-à-dire sur un serveur informatique, on peut faire en sorte de rendre ce serveur aussi performant que possible, et accélérer ainsi l'interrogation des données pour tous les utilisateurs.

Interrogation spécifique ou générique. De nombreuses solutions intégrées de gestion de données proposent leurs propres modes d'interaction avec les données, c'est-à-dire un langage spécifique permettant d'interroger les données contenues dans le système³¹. Au contraire, les SGBD les plus classiques s'appuient plutôt sur des langages de requêtes aussi standardisés que possibles, afin de faciliter l'adoption de leur propre solution à des utilisateurs d'autres plate-formes. La spécificité présente l'avantage de langages plus adaptés aux données manipulées, et donc souvent plus intuitifs dans l'interrogation des spécificités des données. De plus, la spécificité permet aussi une optimisation des requêtes, et est donc souvent plus performante que les solutions plus génériques.

De manière générale et dans le cas de SimFeodal, nous avons préféré privilégier une approche plus générique, faisant appel à des solutions de SGBD plus standardisées. La raison tient principalement à une volonté de généricté du stockage des données : au cours des différentes étapes de construction de SimFeodal, les besoins en matières d'interrogation des données ont évolué. Cette évolution était prévisible et prévue, et nous avons donc choisi dès le départ d'adopter uniquement des solutions modulaires, garantissant une évolutivité facilitée de la base de données, aussi bien regardant sa structure (enregistrement de nouvelles variables ou de nouveaux agents du modèle) que son contenu (massification des données en sortie au fur et à mesure de l'exploration du modèle).

31. Souvent, cette interrogation se fait par appel à des *API* (*Application Programming Interface*, ou Interface de Programmation Applicative en français). Ces interfaces sont propres à chacune des plate-formes, et demandent donc un langage et un formalisme de requête spécifique.

De plus, dans la perspective de ce travail de thèse, où l'on cherche à rendre les productions aussi reproductibles et génériques que possible, il était indispensable de disposer d'un SGBD aussi standard que possible pour en faciliter l'adoption et l'adaptation à d'autres modèles de simulations par exemple.

Bases de données relationnelles ou NoSQL. Même une fois arrêté sur le choix de ne faire appel qu'à des outils standards pour stocker les données, le nombre de solutions disponibles demeure très important. Afin de réduire ce nombre, on peut déjà choisir les grands types de SGBD auxquels faire appel. Les SGBD sont ainsi souvent classés selon les grands traits de la méthode dont ils organisent les données. Les deux grands types³² sont les SGBD « relationnels » et les SGBD « NoSQL ». Si la distinction est sujette à de très nombreux débats, souvent virulents³³, on se contentera ici de définir les SGBD relationnels comme les SGBD, les plus fréquemment utilisés, où l'information est stockée dans des tables composées de champs – les colonnes, correspondant aux variables – et de lignes – les entités décrites par les variables. Le format des données est donc rectangulaire et n'accepte pas, comme dans un tableau statistique, que les entités possèdent un nombre de variables différent, ou encore des types de valeurs différents de celles des autres entités (une même colonne ne peut donc contenir conjointement un nombre et un texte dans des lignes différentes). On nomme ces bases de données relationnelles via la manière qu'elles ont de faire communiquer des éléments hétérogènes, et donc contenus dans des tables différentes : si les tables ont une colonne en commun, on pourra alors effectuer une opération de jointure permettant de mettre en commun les informations de ces tables dans une unique table résultante.

A l'inverse, les SGBD NoSQL se définissent de manière opposée à ce mode de stockage³⁴, rompant par exemple la contrainte d'unicité de type des colonnes, ou de nombre identique de colonnes renseignées pour chaque entité. Pour simplifier le discours, on se contentera de caractériser les SGBD NoSQL comme des SGBD non relationnels. Les SGBD NoSQL ont, en général, de bien meilleures performances et une plus grande flexibilité que les SGBD relationnels. Dans le cas de SimEDB/SimFeodal, où l'on est confronté à des données massives, cela présente un avantage non négligeable.

Toutefois, leur flexibilité est associée à une contrainte majeure en termes de générativité : alors que les SGBD relationnels partagent un langage d'interro-

32. Il en existe d'autres, comme les SGBD orientés objets (quasiment disparus aujourd'hui), orientés graphes (Neo4j...), les SGBD pensés pour le stockage et l'interrogation d'ontologies (*Triplestores RDF*, interrogables en langage SPARQL) ou encore les nouveaux SGBD de type « NewSQL » (Apache Ignite, CockroachDB...) pensés pour une parallélisation massive des données. Ces types de SGBD ne correspondent toutefois pas du tout aux besoins identifiés pour SimEDB/SimFeodal, et sont en général dédiés à des problèmes et marchés de niches. Nous ne les décrirons donc pas plus en détail ici.

33. À l'instar des violentes querelles qui agitent régulièrement les informaticiens : Vim vs Emacs, Programmation Orientée-Objet vs Programmation Fonctionnelle, R vs Python...

34. À l'origine, c'était le sens fort du nom « NoSQL » : Non SQL, le SQL faisant ici référence aux SGBD pré-existants, majoritairement relationnels, dont la mouvance NoSQL, portée par l'apparition des « *big data* » a voulu se distinguer. Sans entrer dans le détail, notons tout de mêmes que de nombreux SGBD NoSQL, qui traduisent désormais cet acronyme par « Not only SQL », sont maintenant relationnels, mais mettent en avant d'autres types d'approches.

gation commun, le SQL (*Structured Query Language*)³⁵, les SGBD NoSQL font plus souvent appels à des langages spécifiques à chaque SGBD. Pour SimEDB, cela impliquerait une forte dépendance au SGBD choisi : en cas de changement de SGBD, toutes les requêtes seraient à reformuler dans le nouveau langage, parfois même selon des logiques extrêmement différentes les unes des autres (dérivés du SQL, interrogations via des objets JSON, via des langages de parcours de graphes...) etc. Au contraire, avec les SGBD relationnels, le langage de requête étant commun, une fois le code d'interrogation généré, il est très aisément de changer de SGBD cible. Cela garantie une forte capacité d'évolutivité aux outils d'interrogation de données tels que SimEDB. Puisque les fournisseurs de données sont interchangeables, on peut en changer au fur et à mesure de l'apparition de nouveaux besoins.

En raison de la générnicité de ces solutions relationnelles, qui vient s'ancrer dans la recherche de reproductibilité et de générnicité de notre démarche d'ensemble, nous avons donc choisi de faire reposer le stockage et l'interrogation des données sur des SGBD relationnels. Cette décision s'est montrée d'autant plus heureuse que, au cours de la construction et de l'évolution de SimEDB, le SGBD choisi pour héberger les données a changé plusieurs fois. La générnicité des outils choisis a permis de minimiser, voire quasiment d'éviter, les changements à apporter au code-source de SimEDB relatif à l'interrogation de données en vue de produire les indicateurs de sortie depuis les données brutes en sortie de SimFeodal.

Entrepôts de données et interrogation directe. En parallèle des SGBD, des solutions « intermédiaires » permettent de s'abstraire des SGBD en eux-mêmes pour mener les requêtes. Ces solutions, que l'on nomme « Entrepôts de Données » (*Data Warehouses*), se comportent comme une surcouche faisant l'interface entre un ou plusieurs SGBD et la requête émise par le client final. Elles se placent donc comme intermédiaire entre les SGBD mobilisés et les applications qui les interrogent. Les entrepôts de données jouent aussi bien le rôle d'agrégateurs de données³⁶ que d'environnements de manipulation et de restructuration de données (on les nomme alors « ETL » – *Extract-Transform-Load*).

Le grand intérêt de ces outils d'interface est d'abstraire la complexité de chacune des bases de données manipulées en générant une interface d'interrogation unique et générique, souvent performante grâce à des optimisations spécifiques (pré-calcul des requêtes possibles par exemple).

35. Ce langage d'interrogation est omniprésent dans l'interaction avec les SGBD, mais aussi, avec de légères variantes, au sein de nombreux logiciels reposant des sélections de données, par exemple les logiciels SIG qui se basent sur la syntaxe du SQL (le fameux triptyque `SELECT ... FROM ... WHERE ...`)

36. C'est-à-dire qu'ils permettent d'agrégier des sources de données composites, provenant potentiellement de différentes sources (plusieurs bases de données relationnelles) et de différents types de sources (différents SGBD, relationnels ou non par exemple).

Environnements OLAP. Dans le domaine de la visualisation interactive de données, ces outils sont beaucoup utilisés, en particulier dans le monde de l'informatique décisionnelle. Ils se révèlent en effet extrêmement utiles quand les données sources ne peuvent être modifiées (par exemple quand elles sont issues de chaînes de collecte complexes, ou encore quand leur volumétrie et leur débit est important), puisqu'ils permettent de constituer une surcouche rendant l'interrogation et la visualisation de ces données accessibles à des analystes non spécialistes de la manipulation de données. Toujours en informatique décisionnelle, il est courant de faire appel à des entrepôts de données d'un type spécifique, les « traitements analytiques en lignes », ou environnements OLAP (*OnLine Analytical Processing*), qui permettent de structurer, par exemple sous formes de cubes de données, des sources de données hétérogènes présentant de nombreuses dimensions.

Environnements SOLAP. Les environnements OLAP ont été utilisés, promus et adoptés dans le champs scientifique de la géomatique, en ce qu'ils permettent de mettre en place rapidement des environnements d'analyse visuelle de données multi-dimensionnelles spatiales et temporelles. Dans ce cadre, où ces outils sont appelés « SOLAP » (*Spatial OLAP*), les données spatiales s'intègrent extrêmement bien en raison de leur capacité à s'emboîter selon les échelles, ouvrant dès lors la voie à des analyses multi-échelles et multi-dimensionnelles complexes.

Dans la communauté géomatique francophone, les solutions SOLAP sont bien représentées (par exemple autour de Sandro Bimonte et de son travail de visualisation de données spatiales environnementales, (BIMONTE 2007; BIMONTE, TCHOUNIKINE et MIQUEL 2005; ZAAMOUNE et al. 2013), et sont couramment employées pour répondre à des questionnements méthodologiques proches de ceux développés dans cet ouvrage. En lien avec les besoins de performances identifiés plus haut, on notera que certaines solutions OLAP permettent aussi d'optimiser la vitesse d'interrogation de bases de données, et visent ainsi à garantir une réponse rapide pour des outils d'interrogation de données interactifs (ZENG, AGARWAL et STOICA 2016).

Performance ou généricité. Nous avons cependant choisi de ne pas faire usage de ces outils pour les mêmes raisons que pour les SGBD NoSQL : les avantages qu'ils présentent ne suffisent pas à contre-balancer la perte de généricité qu'ils impliquent. Pour profiter au mieux de ces environnements, il est en effet nécessaire de faire appel à un nouveau langage d'interrogation des données (le « MDX », de « *Multidimensional Expressions* »). Les différentes solutions OLAP/SOLAP, de plus, présentent les mêmes inconvénients que les SGBD NoSQL : chacune interagit de manière propre aux différents SGBD, et ces outils sont donc difficilement interchangeables.

De la même manière, on se restreindra, parmi les SGBD relationnels interrogables en SQL, à ceux qui disposent d'une méthode d'interrogation standard : si tous ces SGBD acceptent le SQL, certains demandent par exemple

des protocoles spécifiques pour recevoir établir la connexion au SGBD, recevoir la requête et renvoyer les données correspondantes. Pour ce même choix « d'agnosticité » de la plate-forme d'interrogation face à la solution de stockage choisie, on ne conservera que les SGBD acceptant les connexion standardisées (ODBC et JDBC).

SGBD et données spatiales. On a mentionné le fait que les entrepôts de données étaient fortement utilisés, en particulier dans la communauté géomatique, car très appropriés aux données spatiales. De prime abord, ce point peut paraître critique : jusque là, on s'est contenté de mentionner les capacités organisationnelles de SGBD, et non leur aptitude à manipuler des données spatiales. Ce point, dans les SGBD relationnels, constitue un filtre important : sur la centaine de solutions disponibles, seule une poignée est en mesure de stocker efficacement et d'interroger de l'information spatiale³⁷.

Pourtant, au regard des indicateurs de sortie de simulation sur lesquels on s'appuie pour évaluer le comportement de SimFeodal, une grande majorité est non spatiale, en raison de la difficulté à agréger des données spatiales théoriques. Dans SimFeodal, la plupart des indicateurs de sortie sont non spatiaux, c'est-à-dire qu'ils mobilisent plus la dimension attributaire des données que leur dimension géographique³⁸.

La gestion de données spatiales ne constitue donc pas une absolue nécessité, contrairement aux points évoqués auparavant. Elle peut toutefois se révéler avantageuse, ne serait-ce que pour permettre l'observation des configurations spatiales simulées. Cela constitue une approche idiographique, visant à exemplifier plus qu'à synthétiser, mais permet tout de même une compréhension rapide des changements de structures spatiales. Toutes choses égales par ailleurs, on privilégiera donc des solutions de stockage ayant une capacité à gérer les données spatiales.

Pour héberger et organiser les données produites par SimFeodal, en vue de leur interrogation dans SimEDB, nous avons choisi de restreindre la myriade de solutions disponibles grâce à plusieurs filtres successifs. En premier lieu, on a choisi de faire appel à des solutions centralisées (Stockage distribué ou centralisé), au sein de Systèmes de Gestion de Base de Données (SGBD). Ces SGBD permettent une interrogation standardisée (Interrogation spécifique ou générique) via un langage de requête universel, le SQL (Bases de données relationnelles ou NoSQL). On a ensuite décidé d'interroger ces SGBD sans passer par l'intermédiaire d'entreports de données, et au travers de connexion aussi

37. Les données spatiales peuvent être stockées dans tous les SGBD si l'on attribue une représentation textuelle, en chaînes de caractères, par exemple en utilisant le format *Well-Known Text* (WKT). Pour autant, ce format est lourd, inadapté à une indexation, et ne peut permettre à un SGBD de mener des requêtes spatiales directement depuis ces entités. Il est ainsi, par exemple, impossible de calculer le centroïde d'un polygone directement depuis une représentation WKT, alors que c'est aisément avec un stockage géométrique.

38. Les raisons en sont multiples et on y reviendra largement dans le chapitre 7. Notons tout de même que les indicateurs résultent de l'agrégation des réplications, et que cette agrégation est extrêmement complexe sinon impossible sur des données spatiales majoritairement aléatoires (voir chapitre 2, section 2.2.2.1).

standardisées que possible (Entrepôts de données et interrogation directe). Les SGBD répondant à ces critères sont les SGBD « relationnels », dont certains possèdent qui plus est une capacité intéressante à stocker et interroger des données spatiales (SGBD et données spatiales), ce qui constitue notre dernier filtre.

5.3.1.2 Interroger de manière robuste et performante

En dépit de l'accumulation de critères exposée précédemment, une quantité importante de SGBD demeurent en lice. Afin de les différencier, nous avons choisi d'ajouter des critères qui ne portent plus sur les grands types de SGBD, mais plutôt sur une différenciation des SGBD relationnels existants. Ces deux critères, précisés par la suite, sont d'une part la robustesse des SGBD, et d'autre part leurs performances. Ces critères sont pas des « prétextes » à une hiérarchisation quantifiée des SGBD, mais ont une importance prépondérante dans notre cas d'utilisation.

Robustesse des SGBD. Le premier critère ajouté est celui de la robustesse, c'est-à-dire, ici, de la capacité du SGBD à être interrogé de manière (1) stable et (2) pérenne dans le temps. Une même requête sur les mêmes données doit systématiquement renvoyer le même résultat (stabilité), quelle que soit la durée séparant ces requêtes (pérennité). Si la base de données n'est plus interrogable quelques mois après sa configuration, ou qu'elle renvoie des résultats différents, alors elle ne peut constituer une solution crédible à l'exploration d'un modèle sur une période longue.

La stabilité des bases de données est principalement due à la manière de stocker l'information d'un point de vue informatique.

En premier lieu, l'information peut être contenue « en clair » ou alors de manière archivée. Un stockage « en clair » est plus facilement accessible, puisqu'on peut le consulter avec n'importe quel éditeur de texte. Un stockage archivé est moins universel, mais occupe généralement un espace disque inférieur et comporte des mécanismes de vérification de la cohérence des données. Il est donc plus stable.

Une second différenciation tient à l'emplacement lieu du stockage. Celui-ci peut être effectué dans un unique fichier, ce qui a l'immense avantage de la portabilité des données : pour faire migrer ou sauvegarder la base de données, il suffit de copier le fichier. La plupart des SGBD adoptent toutefois un mode d'organisation en plusieurs fichiers, notamment pour des questions de redondance et de vérification de l'intégrité des données : en multipliant les fichiers, on minimise le risque d'erreur critique sur l'ensemble des fichiers à la fois. On notera enfin un dernier type de SGBD, où l'information n'est pas stockée sur un disque dur, mais est entièrement contenue dans la mémoire vive de l'ordinateur : les SGBD « *in-memory* ». Ces SGBD sont les plus rapides et stables, mais il faut les re-constituer à chaque redémarrage du serveur qui les héberge, ce qui peut prendre un temps important.

L'enjeu du choix est de se prémunir de « corruptions » de la base de données : quand le SGBD ne comporte que peu ou pas de mécanismes de vérification de l'intégrité ou de la cohérence des données, il peut arriver qu'une

base de données se corrompe. On peut prendre l'exemple de l'exécution d'une requête demandant un calcul complexe et long. Cette requête pourrait être interrompue en cours d'exécution par faute d'un *bug* ou d'une expiration de sessions (*timeout*). Dans ce cas, il se peut que la base de données s'arrête dans un état muté – avec une nouvelle table ajoutée pour moitié par exemple – et ne soit donc plus intègre. C'est très fréquent pour les SGBD basés sur un unique fichier, ou encore stockés en clair, puisque les nouvelles informations de la base de données y sont ajoutées au fur et à mesure, plutôt que d'être intégrées dans un fichier annexe que l'on pourrait réinitialiser en cas d'erreur.

Avec la volumétrie des données produites par SimFeodal, les requêtes peuvent s'avérer très longues, et une erreur dans une requête peut fréquemment corrompre la base de données. En termes de stabilité, on se tournera donc plutôt vers des SGBD relationnels stables, basés sur une redondance des données et donc sur des architectures archivées et multi-fichiers.

La **pérennité** des SGBD est un sujet proche, tenant aussi à la capacité à interroger les données contenues dans une base de données, mais cette fois-ci du point de vue de l'interrogation en elle-même plutôt de des données sur lesquelles elle s'applique : si le SQL est un langage standard³⁹, les types de données intégrées varient cependant d'un SGBD à un autre (champs textuels ou d'entiers « courts » par exemple). SQL étant un langage typé, selon la manière (bas niveau) dont sont intégrées les données, certaines requêtes identiques peuvent renvoyer des résultats différents selon les SGBD. Plus gênant, les normes implémentées peuvent varier d'une version à l'autre d'un SGBD. Un SGBD relationnel respectant strictement la norme SQL pourrait ainsi évoluer pour supporter plus de fonctionnalités, par exemple en ajoutant des fonctions plus récentes (fenêtres glissantes, ajouts en masse etc.), et renverrait dès lors des résultats différents selon les versions. Pour les SGBD les plus employés, le nombre d'utilisateurs garantit une rétro-compatibilité des requêtes. Pour les SGBD de moindre envergure cependant, par exemple les plus performants et récents issus de la recherche en informatique, cette rétro-compatibilité n'est pas du tout garantie.

Comme souvent en matière d'infrastructure informatique, il est donc nécessaire de tenir compte d'un compromis entre l'ancienneté et la forte adoption de certains SGBD d'une part, et les facilités et gains de performances amenées par les plus récents d'autre part. Dans le cas des données de SimFeodal, en tenant compte de cet inévitable compromis, nous avons choisi de privilégier des SGBD reconnus, soient-ils anciens et fortement adoptés ou plus récents mais utilisés par des acteurs d'envergure⁴⁰. Ce faisant, on se coupe immanquablement de solutions extrêmement intéressantes et performantes⁴¹. Ce choix est

39. Dans les faits, on notera tout de même qu'il existe plusieurs normes successives, des « révisions » du SQL, qui apportent chacune leur lot de subtilités dans l'usage du langage. Les SGBD interrogables en SQL ne disposent donc pas toutes des mêmes fonctionnalités, selon la révision du SQL qu'elles respectent.

40. La liste des solutions envisagées, ensuite comparées à l'aube de leurs performances, est visible dans l'axe des ordonnées de la figure 5.9.

41. Par exemple BlinkDB (AGARWAL et al. 2013), qui permet de limiter une requête à un temps maximal d'exécution donné : quand la requête n'est pas complète, le SGBD renvoi une

toutefois en la large faveur d'une meilleure garantie de pérennité, et de robustesse en général, des données de SimFeodal.

Performance des SGBD. Une fois que les solutions disponibles ont été discriminées par leur type, par leur interface avec les requêtes et par leur robustesse, la quantité de SGBD restant demeure de l'ordre de la dizaine. Pour choisir, parmi ceux-là, le SGBD qui sera le plus adapté aux besoins identifiés, il est donc nécessaire d'établir des critères plus précis et quantifiables. Dans le cas d'une application interactive, c'est-à-dire où le nombre de requêtes émises au cours d'une session d'utilisation peut être importante, les performances des SGBD constituent un critère majeur pour départager l'ensemble des SGBD considérés.

Il est difficile de qualifier les « performances » d'un SGBD : on entend en fait par ce terme un vaste ensemble hétérogènes de propriétés. On peut par exemple juger les performances par le filtre de la mémoire occupée par le stockage d'une base de données, ou encore par le nombre de requêtes concurrentes que peut gérer un SGBD, ou encore par la capacité à paralléliser le stockage sur plusieurs serveurs. Dans notre cas, ces points sont assez peu significatifs : en dépit de la quantité de sorties, l'ordre de grandeur – quelques gigaoctets de données – reste largement entreposable sur un environnement classique, sans besoin de parallélisation. De la même manière, SimEDB est un environnement dédié à des utilisateurs experts, en petit nombre : les chercheurs travaillant autour de SimFeodal. La quantité de requêtes simultanées ne peut donc pas dépasser la dizaine, ce qui constitue une trivialité pour l'ensemble des SGBD relationnels classiques. On s'attachera donc à juger les performances en matière de rapidité d'exécution des requêtes. Il ne s'agit pas ici de choisir un SGBD qui ferait gagner quelques millisecondes par rapport à un autre, mais plutôt de discriminer les SGBD présentant une durée de réponse trop importante pour notre usage.

En effet, plus les données sont massives, plus le temps d'exécution d'une requête augmente, souvent sous la forme d'une fonction puissance. Si tous les SGBD présentent des vitesses acceptables et proches sur des bases de données de faible volume, l'écart s'accroît considérablement à mesure que les données s'accumulent. La figure 5.9⁴² montre les différences incontestables qui existent entre les SGBD étudiés. On peut y constater que l'écart est gigantesque, par exemple vis-à-vis du temps nécessaire à une jointure, entre les 4 secondes de MonetDB et les 300 secondes (5 minutes...) de SQLite. Le choix d'un SGBD selon ses performances a donc un impact majeur sur la fluidité d'une application d'exploration de données massives. Pour départager les SGBD, on comparera

estimation du résultat, estimation qui gagne en précision quand on augmente la limite temporelle. Un SGBD de ce type serait extrêmement précieux en *visual analytics*, mais la jeunesse de cet outil ainsi que sa nature de projet de recherche rendent incertain la continuité de son développement dans le temps. En 2018, le projet semble d'ailleurs avoir été abandonné...

42. Dans cette figure, on compare la rapidité de différentes requêtes sur un jeu de données identique selon les SGBD. Ce type de test de performance permettant la comparaison de solutions techniques diverses est appelé *benchmark*. Ce jeu de données, composé de 100 Millions de lignes et de deux colonnes numériques, présente une volumétrie comparable (franchement inférieure en nombre de colonnes toutefois) à celle des données issues de SimFeodal qui sont interrogées dans SimEDB.

leurs performances selon les différents types d'opérations demandées, qu'elles concernent l'écriture dans la base (insertion) ou des types de lecture (agrégation et jointure).

Performances en écriture et en lecture. La figure 5.9 affiche des résultats qui semblent globalement ordonnés (les quatre premiers SGBD sont par exemple quasiment toujours plus lents que les 2 derniers), mais fluctuent cependant à la marge selon les opérations demandées. La première colonne du graphique montre ainsi le temps nécessaire à l'insertion du jeu de données exemple (voir la note de bas de page 42) dans le SGBD depuis un fichier CSV. Les deux colonnes suivantes exposent le temps nécessaire au traitement d'une requête, donc à une interrogation des données une fois archivées dans les bases de données. On peut constater que le classement des SGBD varie faiblement en lecture, et de manière assez faible en insertion : les deuxièmes et troisièmes colonnes respectent un ordre globalement similaire, assez différent de celui de la première colonne. Dans un environnement classique, la performance d'insertion de données est un facteur prépondérant : quand de nouvelles données sont ajoutées constamment, par exemple pour stocker des données issues de capteurs automatiques, l'insertion peut vite constituer le goulot d'étranglement de la solution.

Pour SimFeodal, l'insertion n'est pas véritablement un enjeu : les données sont ajoutées par bloc, manuellement, une fois que des nouvelles simulations ont été exécutées. C'est donc au pire un acte quotidien, mais dans ce cas, que la requête demande 10 secondes (MapD) ou 10 minutes (MySQL InnoDB), cela n'a que peu d'impact. La première colonne est donc un indicateur de performance peu adapté dans notre cas.

Les deux colonnes suivantes, relatives à l'interrogation de données, se révèlent au contraire extrêmement importantes : à chaque action de l'utilisateur de SimEDB, une nouvelle requête est envoyée pour calculer un nouvel indicateur correspondant au jeu de données filtré manuellement (cf. section 5.2.5). À chaque affichage d'onglet, une nouvelle requête est donc émise et traitée. Même si tous les indicateurs ne sont pas systématiquement mobilisés – et donc calculés – (cf. chap 3), cela signifie tout de même que pour chaque sélection, une bonne dizaine d'indicateurs seront observés, et donc, autant de requêtes. Quand une requête demande 60 secondes (par exemple PostgreSQL en « jointure »), cela implique que chaque indicateur requiert au moins une minute avant de s'afficher. Pour observer une dizaine indicateurs, l'utilisateur devra donc attendre patiemment une dizaine de minutes, sans même tenir compte du temps qu'il passera à les analyser visuellement.

Pour noircir le trait, notons de plus que les résultats communiqués dans la figure 5.9 correspondent à des requêtes simples qui ont valeur d'exemples de base. Dans le cas de SimEDB, le calcul des indicateurs requiert des requêtes plus complexes, faisant appel à des agrégations et à des jointures en même temps, et les délais affichés dans ce *benchmark* sont donc bien inférieures aux durées éprouvées en conditions réelles au sein de SimEDB.

Performances comparées de SGBD

Temps nécessaires à l'exécution de requêtes

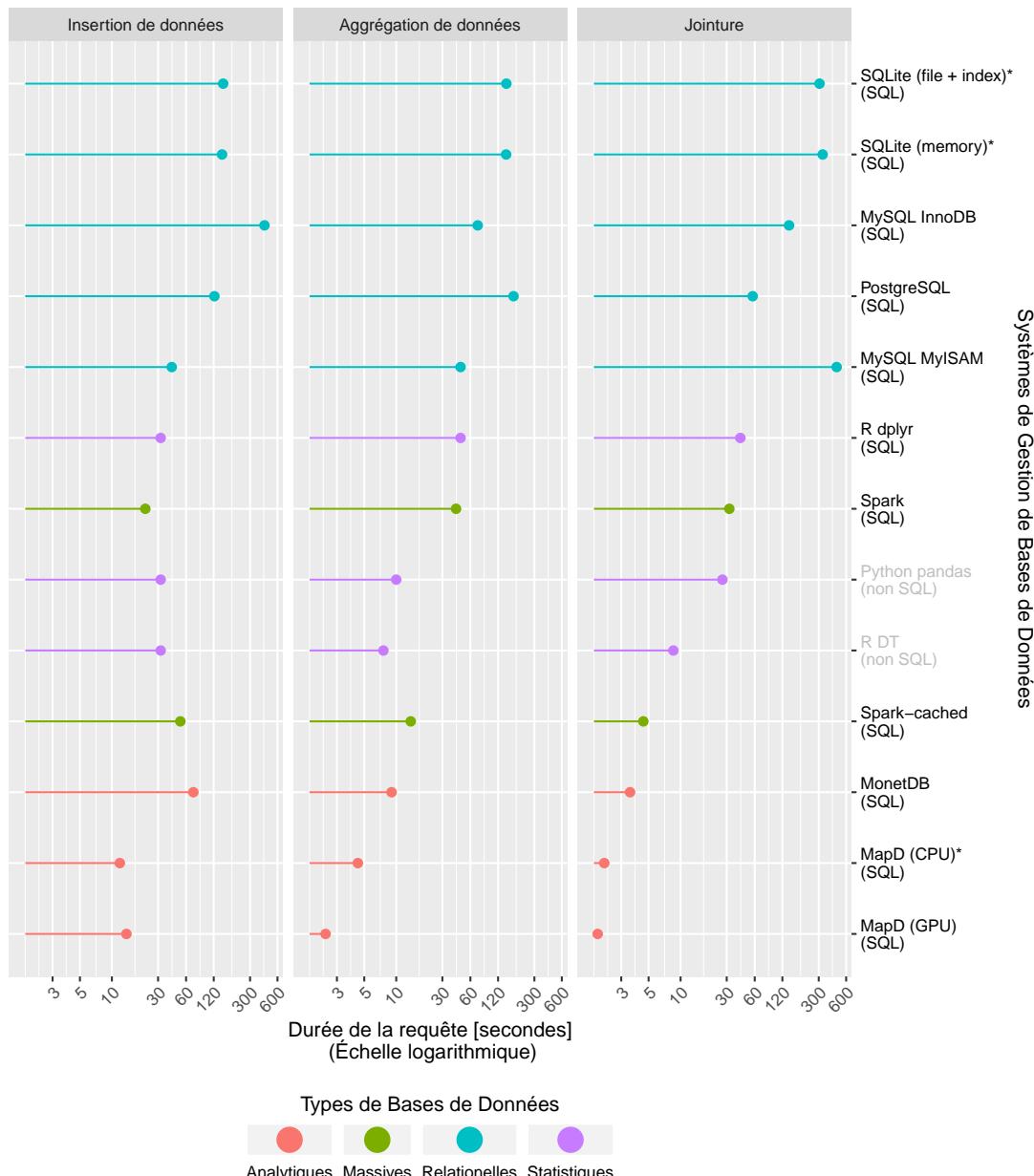


FIGURE 5.9 – Comparaison de la performance de différents SGBD sur un jeu de données test de 100 millions de lignes. Résultats tirés de PAFKA (2017) et complétés par l'auteur.

Les « types de Bases de Données » correspondent aux usages les plus fréquents des SGBD comparés :

- Analytiques : SGBD optimisés pour les traitements de type agrégation, via une architecture orientée colonne plutôt qu'orientée ligne comme dans les SGBD Relationnels. Ils sont optimisés pour la rapidité d'exécution.
- Massives : SGBD pensés pour la gestion et l'interrogation de données massives (big data), permettant notamment une parallélisation des requêtes. Ils sont optimisés pour la capacité à gérer des volumes gigantesques de données.
- Statistiques : SGBD internes aux environnements de traitement de données statistiques, reposant sur une gestion en mémoire vive. Souvent intégrés d'office dans les environnements décrits (R, Python), ce sont les SGBD les plus simples à mettre en place et à manipuler.

De l'intérêt de gagner quelques secondes. La figure 5.9 permet d'isoler un sous-ensemble de quatre SGBD ayant, avec le jeu de données testé, des réponses inférieures à une dizaine de secondes : Spark avec cache, MonetDB et MapD sur CPU ou GPU. On pourrait se contenter de choisir le SGBD le plus complet parmi ces quatre solutions.

Pourtant, un autre domaine d'étude appuie l'importance relative des écarts, mêmes faibles, dans les durées de requête. Ce domaine est celui des sites internet, où les requêtes servent à générer le contenu de différentes pages en interrogeant des bases de données de contenu. La consultation d'un site internet consiste à charger plusieurs pages, pour l'utilisateur. Du point de vue du serveur, chacune des pages demandées par l'utilisateur requiert différentes requêtes à des bases de données. La navigation dans un site est donc assez comparable à l'utilisation d'une application d'exploration de données : des requêtes hétérogènes, plus ou moins lourdes, s'y succèdent et visent à filtrer et mettre en forme, de manière explicite, des extraits d'informations stockées dans des bases de données. Plusieurs études ont montré que la durée d'affichage d'une page web jouait de manière considérable sur l'usage d'un site, composé de plusieurs de ces pages. L'étude la plus parlante est décrite par Neil PATEL qui relate une expérience vécue au sein du moteur de recherche Google :

« Google did an interesting experiment with regard to load times. Google Vice President Marissa Mayer asked web surfers – would you rather see 10 or 30 results for your Google search? The users agreed that 30 results per page sounded like a good idea. So Google implemented it on some results pages. Then the shock came. Pages that displayed 30 results each had traffic to them drop an astounding 20%. Google tested the loading difference between the 10 and 30 results pages and found that it was just **half of a second**. If half of a second made that much of a difference in how long users were willing to wait, how much of a difference could it make to your site if you carved a second or two off of load time? »

(PATEL 2011)

Si l'environnement et les conditions décrites ne sont pas directement comparables avec celles de SimEDB, il demeure qu'une différence même faible dans un temps de chargement, ou, pour SimEDB, dans un temps d'affichage d'un indicateur de sortie, pourrait avoir des conséquences négatives pour l'utilisation de la plate-forme.

Un autre exemple appuie ce raisonnement et répond à la dernière interrogation de PATEL, dans un cadre un peu plus proche de SimEDB. Roxana ELLIOTT, employée d'une société qui propose des solutions d'accélération de sites web, a réalisé un rapport sur les pertes d'audience des sites webs en fonction du temps de chargement des pages (ELLIOTT 2017). Les résultats de son étude sont présentés dans la figure 5.10, et permettent de quantifier un effet bien connu, qui veut que l'utilisateur quitte plus rapidement un site (et en visite donc moins de pages) quand les pages sont plus longues à charger.

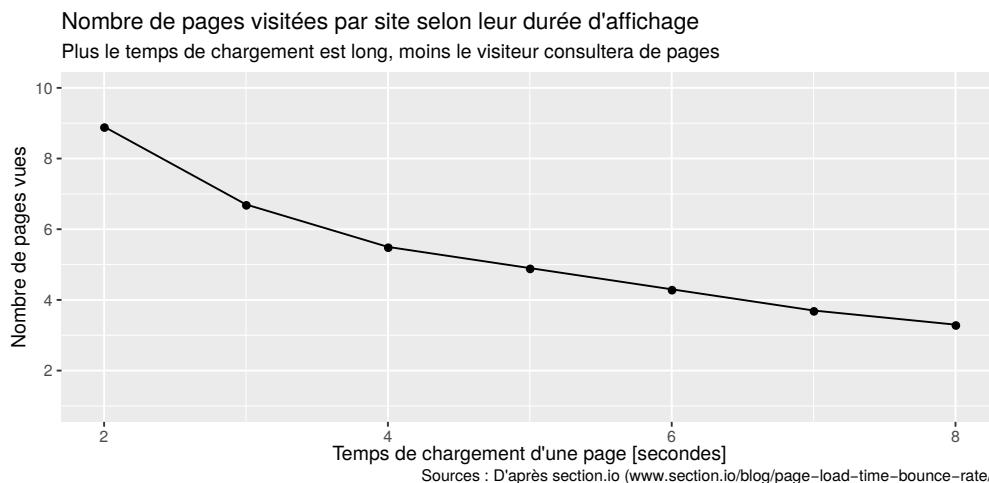


FIGURE 5.10 – Impact du temps de chargement d'un site web sur sa consultation.
D'après ELLIOTT (2017).

Cet exemple est plus directement comparables aux contraintes de SimEDB. Chaque consultation d'un indicateur de sortie correspond ainsi à la vue d'une page dans cet exemple. Ces chiffres renforcent l'importance à accorder au temps de chargement des indicateurs, et donc à la durée de l'exécution des requêtes qui les génèrent. Quelques secondes de différence dans le chargement suffisent ainsi à réduire drastiquement le nombre d'indicateurs que l'utilisateur acceptera d'analyser.

On peut toutefois pondérer ces comparaisons et minimiser l'importance d'écart de l'ordre de grandeur de la seconde. Dans le cas de SimEDB, contrairement à celui d'un site web ou d'un moteur de recherche, l'utilisateur est « captif ». Cela signifie qu'un thématicien souhaitant explorer les résultats produits par SimFeodal n'aura d'autre choix que de passer par SimEDB. De même, sachant que la plate-forme présente pour lui un intérêt professionnel, le thématicien sera bien plus patient que face à un quelconque site de courses en lignes.

Dans le cadre d'environnements de type *visual analysis*, il a été montré que les utilisateurs d'environnement d'exploration étaient toutefois fortement affectés par l'accroissement de délais. Zhicheng Liu et Jeffrey Heer (LIU et HEER 2014) montrent ainsi qu'en introduisant une latence supplémentaire de 500 ms dans une application interactive d'exploration de données spatio-temporelles, le nombre d'interactions chute fortement, quand bien certains utilisateurs de cette application ne remarquent même pas la différence de délai.

Choisir un SGBD adapté à SimEDB. L'ensemble de filtres successifs a permis de réduire progressivement la quantité de solutions logicielles appropriées à l'organisation et à l'interrogation des données issues de SimFeodal. Depuis les centaines de solutions disponibles, on parvient ainsi dans un premier temps à isoler les grands types de SGBD correspondant aux besoins identifier : les SGBD relationnels, basés sur une interrogation standardisée en SQL. Ces outils sont ensuite départagés au prisme de leur robustesse, intrinsèque (stabilité) et sur la base de leur niveau d'adoption (pérennité). Un *benchmark* finit de restreindre la liste des possibles à quelques solutions envisageables en fonction des besoins soulevés par SimEDB.

Au regard des performances de chacun des SGBD, MapD (ROOT et MOSTAK 2016) présente l'avantage indéniable de la vitesse de traitement des requêtes, tout en étant compatible avec les standards de l'interrogation de données (langage de requête SQL, interfaçable via JDBC). Même exécuté sur un infrastructure informatique n'est pas optimisée pour cette solution⁴³, MapD est incontestablement plus performant que les autres SGBD.

On notera toutefois que le SGBD MonetDB (VERMEIJ et al. 2008), dans son implémentation intégrée MonetDBLite (RAASVELDT et MÜHLEISEN 2018), affiche aussi des performances très compétitives, et aurait pu être choisi pour SimEDB, présentant notamment l'avantage d'être plus utilisé et ancien⁴⁴. Un des ouvrages de référence en *visual analytics* s'interrogeait d'ailleurs sur les nouvelles possibilités et l'adéquation offertes par ce SGBD (FEKETE 2010, p. 105 in KEIM et al. 2010).

Nous avons au final préféré MapD, en particulier parce que les données issues de SimFeodal sont amenées à augmenter, renforçant donc petit à petit l'écart de performance entre MapD et MonetDB. Par ailleurs, par une heureuse coïncidence, MapD a été placé sous licence libre peu avant que nous n'ayons à nous pencher réellement sur les problèmes de performances et de robustesse qui apparaissaient suite à l'augmentation du nombre de simulations effectuées.

5.3.2 Structuration des données de SimFeodal

Le choix d'un SGBD est une étape indispensable à la mise en place d'une base de données, mais il ne concerne que le domaine technique, voire méthodologique, mais aucunement le domaine conceptuel. Un SGBD est un support logiciel qui permet le stockage et l'organisation de données. Il n'est utile qu'une fois que le mode d'organisation des données a été décidé. L'organisation a proprement parler des données est explicitée dans un modèle conceptuel, nommé Modèle Conceptuel de Données (MCD). Un MCD est propre à un ensemble de données d'une part⁴⁵, et un ensemble de problématiques d'autres part⁴⁶. Ce MCD décrit donc les « tables », leur composition (attributs) et les liens entre tables qui permettent de mener des interrogations croisées. Par exemple, on

43. MapD est ainsi un SGBD optimisé pour l'analyse sur processeurs graphiques (les GPU), présents dans les cartes graphiques modernes, contrairement aux SGBD classiques qui s'appuient sur les processeurs (CPU) pour effectuer leurs calculs. Dans le cadre de cette thèse, nous n'avions pas accès à un serveur doté de GPU, et MapD est donc installé sur une infrastructure à base de CPU, bien moins performante.

44. Dans les faits, MonetDBLite a été le SGBD utilisé pendant une large partie de la conception de SimEDB. Il s'est toutefois révélé assez instable dans notre cas, faisant preuves à plusieurs reprises de corruptions de données ayant entraîné l'obligation de recréer entièrement les bases de données depuis les fichiers bruts produits par SimFeodal.

45. Le MCD décrit la manière dont les données sont stockées, organisées et mises en relations. Il ne peut donc être générique, et doit être modifié quand la structure des données évolue.

46. Il y a une infinité de possibilité d'organisation d'un même jeu de données. Le MCD permet d'organiser ces données en vue de répondre à des questions, exprimées sous formes de requêtes particulières. Appliquées au même jeu de données, différents MCD permettront de répondre plus ou moins facilement (et de manière plus ou moins performante) à certaines questions.

peut avoir une table élèves, contenant les informations relatives aux élèves d'un établissement, une table enseignants, et une table classe qui permet de faire le lien entre les élèves d'un enseignant, ou au contraire entre un élève et tous ses enseignants.

Les choix de conception d'un MCD sont fortement liés aux types de SGBD dans lesquelles ils doivent être implémentés. On ne peut que difficilement implémenter un MCD très relationnel dans un SGBD pensé collection (NoSQL par exemple). À l'inverse, le stockage d'informations très hétérogènes sur un ensemble d'individus sera complexe à implémenter au sein d'un SGBD relationnel.

Pour décider de la manière la plus efficace d'implémenter les données issues de SimFeodal dans un SGBD, et donc du MCD à suivre, il convient de revenir aux spécificités des données produites par le modèle d'une part, et d'autre part de réfléchir aux modes d'interrogations privilégiés, lesquels orienteront la conception du MCD.

Pré-traitement des données. Les données produites par un modèle de simulation sont des données « brutes », c'est-à-dire qu'elles ne sont pas organisées de manière rationnelle, contiennent une quantité non négligeable d'informations incomplètes, superflues ou erronées.

- Par exemple, quand une simulation est arrêtée en cours, soit volontairement, soit en raison d'un *bug*, les données générées par le modèle sont **incomplètes** : elles ne concernent qu'une partie des pas de temps attendus. Elles sont pourtant exportées dans les fichiers bruts, rendant ceux-ci hétérogènes en matière de complétion des informations enregistrées. Pour pouvoir analyser une expérience, il faudra supprimer ces données incomplètes pour qu'elles n'influencent pas l'étude des simulations complétées et donc comparables.
- De la même manière, il arrive qu'on exécute, par erreur, plusieurs fois les mêmes simulations. Dans ce cas, le nombre de réplications de chacune des expériences ne sera pas systématiquement le même. Cela pose un problème de comparabilité dû à tailles d'échantillonnage différentes. On fait donc face à un problème de données **superflues** : il faudra supprimer une partie de ces simulations des données avant de pouvoir les traiter.
- On peut enfin voir subvenir des erreurs d'exécution du modèle au niveau des agents, par exemple quand, en raison d'un *bug*, un agent en interroge un autre qui a disparu depuis. Il arrive ainsi fréquemment que des foyers paysans déclarent une appartenance à un agrégat qui a disparu depuis, faute à une mise à jour échouée dans le modèle. Dans ces cas, les données seront aussi inscrites dans les sorties de SimFeodal, quand bien même elles sont **erronées**.

Les données brutes doivent donc nécessairement être vérifiées, filtrées, nettoyées et retravaillées avant de pouvoir les exploiter en vue de générer les indicateurs de sortie.

Organisation des données. Même pré-traitées, les données brutes conservent une structure tabulaire assez peu adaptées à un traitement. les attributs de chacun des types d'agent sont enregistré dans des fichier spécifiques. Que ces fichiers aient été nettoyés ou non, ils demeurent fondamentalement isolés les uns des autres. Une partie des indicateurs repose sur des analyses croisant différents types d'agents (dans quels pôles les agrégats s'inscrivent-ils par exemple ?), et il est donc nécessaire de permettre – et de fluidifier – ces requêtes croisées. On a mentionné le choix de SGBD relationnels, il convient donc de concevoir et d'implémenter, dans le SGBD choisi, les relations entre les différentes tables individuelles qui proviennent des sorties brutes d'un modèle.

5.3.2.1 Quel modèle de données ?

Les MCD sont propres à chaque ensemble de données et questionnement associés. Il y a toutefois des grandes tendances dans l'organisation des données. Le MCD peut ainsi être catégorisé, selon sa forme, dans des familles de modèles de données. On nomme ces catégories « modèles logiques » ou « schémas » (*logical schema* en anglais). Ceux-ci décrivent la manière dont les données sont structurées et surtout reliées les unes aux autres, d'une manière générique contrairement aux MCD.

Un modèle « en étoile ». Les bases de données relationnelles peuvent s'appuyer sur de nombreux schémas différents. Sans entrer dans le détail, notons que chacun des schémas existant présente des avantages et des inconvénients liés aux types de requêtes qui lui seront adressés. Par exemple, un schéma « en étoile » (*Star Schema* 2018) privilégie l'efficacité de requêtes d'agrégations et de jointures, au détriment de la robustesse des données et de la diversité possible des requêtes. Certains types de requêtes, complexes, seront ainsi difficiles, voire impossibles, à exprimer dans ce type de schéma.

Au contraire, un schéma « en flocons » (*Snowflake Schema* 2018) peut se révéler plus permissif en terme de capacités de requêtes. L'inconvénient est une plus forte complexité des requêtes de bases (exprimées de manière plus verbeuses et tortueuses) et donc une expressivité moindre.

Pour choisir un schéma, et donc une manière d'organiser la base de données, il convient donc de savoir – ou de prévoir – le type de requêtes qui lui seront adressées. Dans le cas des données de SimFeodal, les indicateurs avaient été définis avant que le besoin d'une interrogation performante et structurée n'apparaisse. On connaissait déjà les indicateurs nécessaires et le type de requêtes associés. Nous savions ainsi qu'une majorité des requêtes seraient des tâches d'agrégations simples (nombre d'agrégats au cours du temps, taux de foyers paysans dispersés au cours du temps etc.), pour lesquelles il fallait minimiser la complexité des requêtes et calculs.

Il a été choisi de partir d'un schéma en étoile, puisque celui-ci se montre extrêmement efficace pour réduire les besoins en jointures – chronophages – et pour des tâches d'agrégations lourdes.

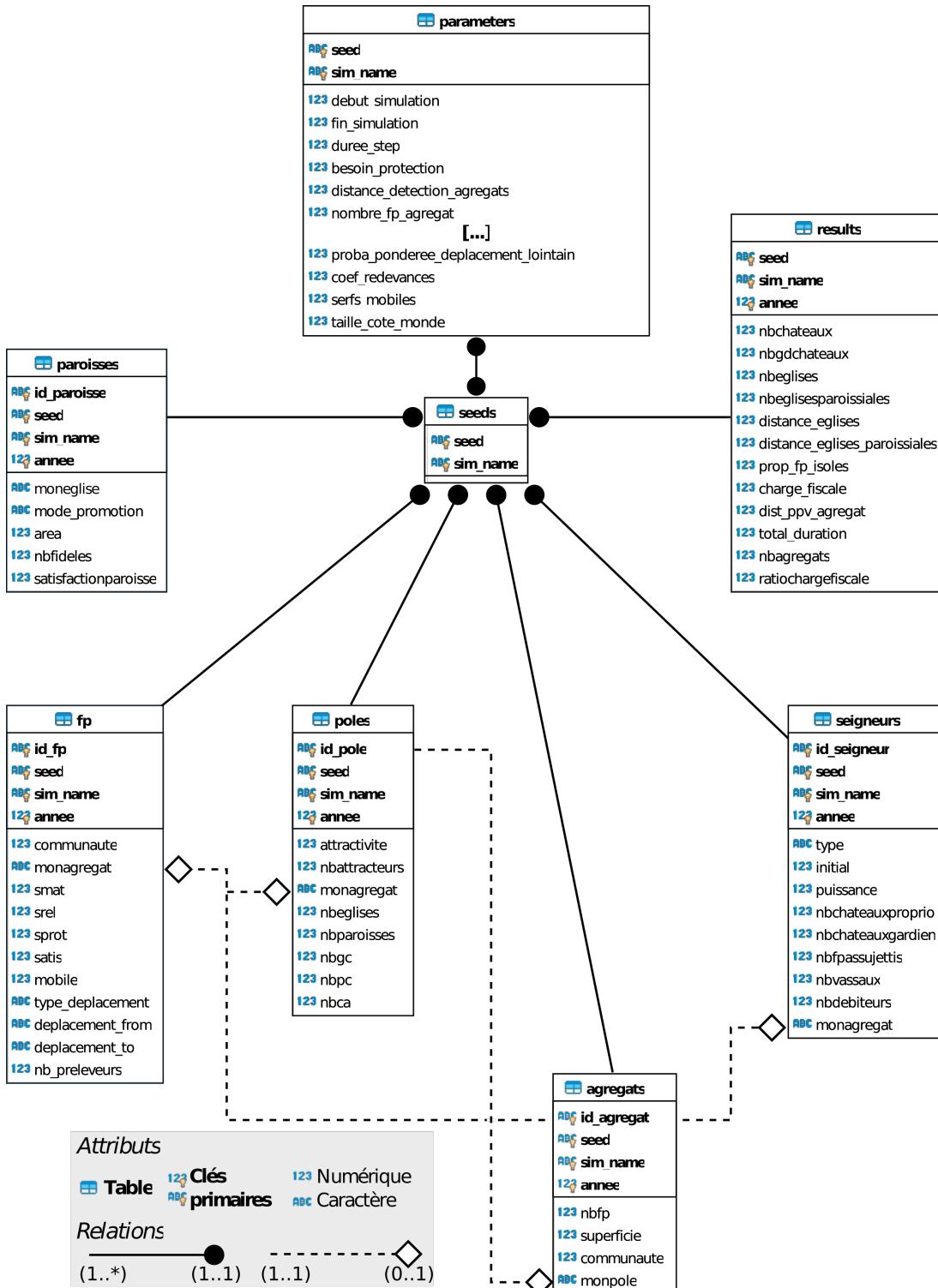


FIGURE 5.11 – Modèle Conceptuel de Données (MCD) des données en sortie de simulation de SimFeodal telles qu’implémentées dans SimEDB.

Au centre de cette étoile (voir figure 5.11), il était donc évident de disposer une table simple, contenant les informations sur lesquelles une majorité des agrégations seraient effectuées : les simulations, identifiées par leur nom (**sim_name**, qui permet de savoir de quelle expérience ces simulations dépendent) et leur identifiant unique, la graine aléatoire utilisée (**seed**)⁴⁷.

47. La graine aléatoire ne constitue en tant que tel pas un identifiant unique : comme son nom l’indique, elle est aléatoire et présente donc un risque de répétition. Dans Gama, cette graine aléatoire est une valeur qui varie de 0 à 1 et est composé de 19 décimales. Il y a donc potentiellement 10^{19} graines aléatoires uniques, ce qui est en soi une quasi garantie d’unicité. Notons de plus que dans le MCD de SimEDB, la graine aléatoire est systématiquement associée

Relier les tables. Toutes les tables contenant les enregistrements individuels des agents (fp pour les foyers paysans, paroisses pour les églises paroissiales, etc.) sont donc liées directement à cette table centrale (intitulée seeds ici).

En dehors de ces tables liées aux agents, deux autres tables « globales » sont présentes : une table « results », qui contient des informations agrégées sur l'état de chaque simulation à chaque pas de temps. Ces informations, par exemple le taux de foyers paysans isolés (champ « prop_fp_isoles »), sont redondantes : elles pourraient être calculées directement depuis la table renseignant les foyers paysans, en faisant un ratio entre le nombre de foyers paysans sans agrégat et leur nombre total. Pourtant, pour des raisons d'efficacité autant que de clarté, il a été choisi de dupliquer, en les pré-calculant, ces informations qui sont interrogées extrêmement souvent pour calculer les indicateurs de SimFeodal.

Autre table ne répondant pas au schéma classique, la table « parameters » fournit toutes les méta-données sur les simulations. On y retrouve par exemple les valeurs de paramètres de chacune des simulations, identifiées toujours par le couple sim_name et seed. Cette table est la seule à être reliée de manière bi-directionnelle à la table centrale (seeds), en particulier en raison de l'usage qui en est fait interactivement (voir l'encadré 5.2).

Notons tout de même que l'on s'éloigne légèrement du classique schéma en étoile en raison des relations que nous avons choisi d'insérer entre les tables des différents agents (relations notées en pointillées dans la figure 5.11). Intégrer ces relations dans la table centrale aurait considérablement complexifié cette dernière, mais pour autant, elles étaient nécessaires : SimFeodal est un modèle complexe, dans lequel des interactions sont présentes à plusieurs niveaux entre différents types d'agents. La base de données résultant de ce modèle complexe l'est donc nécessairement aussi : on doit implémenter, dans la base de données, des relations entre les tables pour chacune des interactions entre les agents du modèle. Ici, ces relations permettent par exemple d'étudier la composition des pôles autour de chaque agrégat, et ainsi d'étudier le lien entre poids du pôle (en nombre d'attracteurs) et poids de l'agrégat (en nombre de foyers paysans).

Ces indicateurs, situés à l'intersection de différents types d'agents, sont toutefois moins utilisé que les indicateurs plus directs ([ref à chapitre 3, indicateurs](#)). Les requêtes correspondantes, moins fréquentes, ne perturbent pas les logiques et performances d'ensemble de SimEDB : elles auraient plus facilement exprimées dans un schéma « en flocons », mais leur relative rareté ne remet aucunement en cause l'organisation générale du MCD.

au nom de l'expérience. Même en menant un million de réplications, la probabilité que deux simulations partagent la même graine aléatoire serait largement inférieure à 1%. La graine aléatoire constitue donc un identifiant unique robuste dans notre cas.

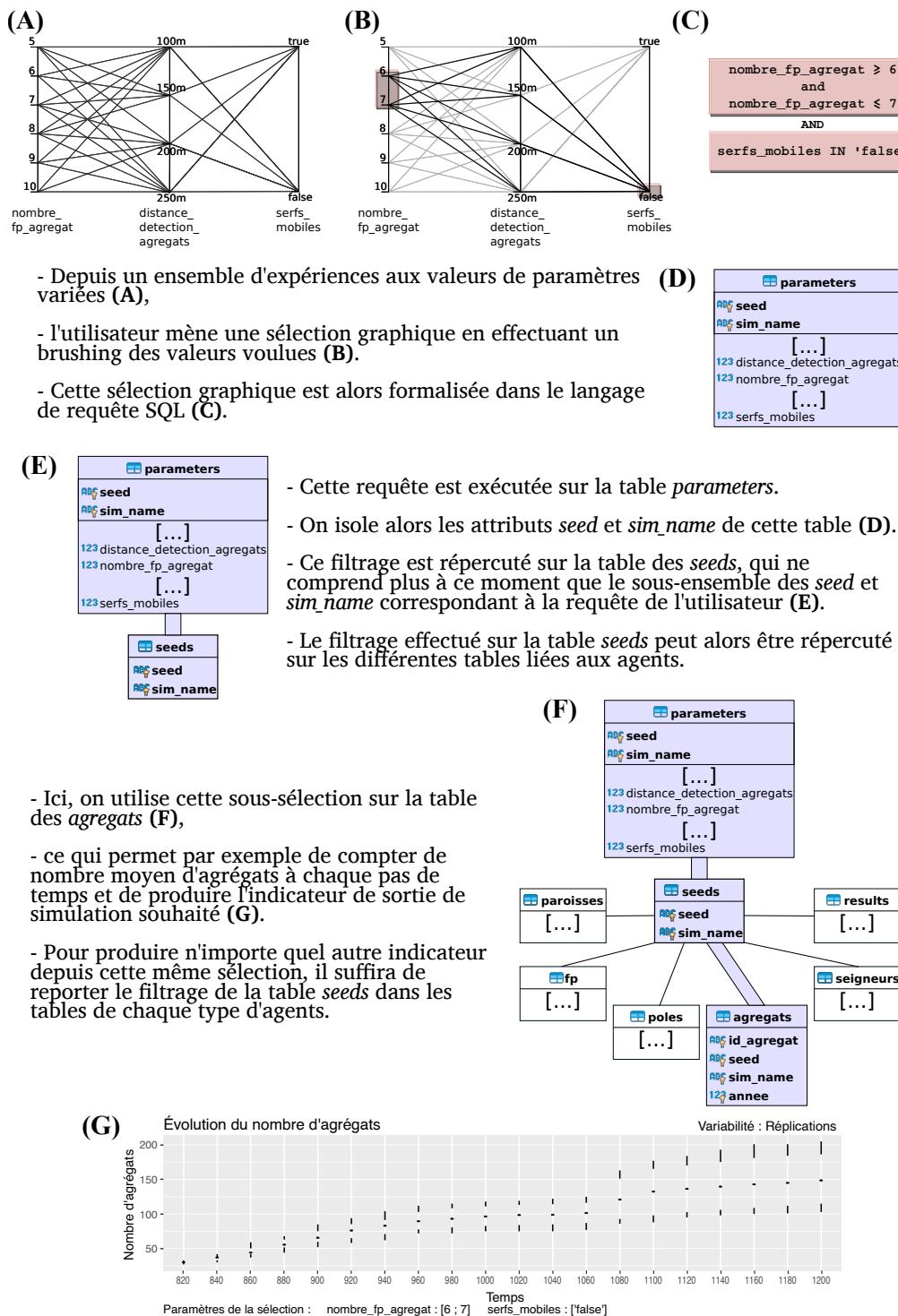
5.3.2.2 Un modèle de données pour favoriser l’interrogation et le filtrage conjoint

Le schéma choisi et le Modèle Conceptuel de Données (MCD) associé, permettent une interrogation rapide des données en simplifiant les tâches d’agrégation et en minimisant la quantité de jointures nécessaires à la génération des indicateurs de sortie. Le choix de s’écarte légèrement du schéma en étoile présente un autre avantage, extrêmement utile, dans le cadre d’une exploration interactive des indicateurs de SimFeodal. En effet, comme on l’a vu auparavant (section 5.2.6), dans SimEDB, on compare les simulations en les isolant à partir des valeurs de paramètres qui leur correspondent, via un acte de *brushing* des valeurs de paramètres présentées dans un graphique en coordonnées parallèles interactif. Du côté du MCD, la table correspondante est la table parameters. Quand l’utilisateur sélectionne un sous-ensemble de valeurs de paramètres, la table est filtrée, et ne renvoie donc que les simulations correspondantes.

C’est ici que l’intérêt de la table seeds et de son lien bidirectionnel avec la table parameters apparaît : une fois parameters filtrée, cette sélection est renvoyée à la table seeds, et se répercute donc directement à toutes les autres tables. Avec une unique requête, qui plus est sur une table de faible dimension (seeds ne comporte que deux champs), le filtrage est donc extrêmement rapide, accélérant d’autant le filtrage des autres tables et donc la génération des indicateurs de sortie. Ces étapes de filtrage successifs, optimisées par l’architecture choisie pour les données de SimFeodal, sont présenté dans l’encadré 5.2.

Encadré 5.2 : Un exemple d'interrogation de la base de données de SimEDB.

La figure 5.12 présente l'ensemble des étapes qui permettent de générer un indicateur de sortie. Cette planche montre un exemple de sélection faite dans l'application SimEDB, et décrit la manière dont cette sélection est répercute à travers le MCD de SimFeodal (figure 5.11). La démarche aboutit par la sélection d'un ensemble de données, qui répondent à un critère sur deux paramètres du modèle. Cette sélection est ensuite utilisée pour générer un indicateur de sortie, ici, l'évolution du nombre d'agrégats au cours du temps.

**FIGURE 5.12 – De la sélection interactive à l'indicateur de sortie.**

Une organisation dédiée à l'exploration interactive

La présentation des choix d'organisation de données témoigne d'une visée résolument applicative, c'est-à-dire visant à penser l'organisation, la structuration et les SGBD d'implémentation, comme au service de la plate-forme d'exploration SimEDB. Le SGBD choisi, MapD, est ainsi un logiciel particulièrement adapté aux besoins identifiés, c'est-à-dire à une efficacité et une robustesse d'interrogation des données générées par SimFeodal. MapD est interrogable de manière universelle, via des protocoles de connexion standards, au moyen d'un langage qui fait office de *lingua franca* de l'interrogation de données, le SQL. Au sein du SGBD, la structure des données, révélée dans le MCD qui adopte une structure « en étoile », vise aussi à faciliter et à optimiser la vitesse des requêtes visant à générer les indicateurs de sortie de SimFeodal. Cette structure de données est enfin pensée, en amont, pour minimiser le nombre de requêtes nécessaires à l'affichage des indicateurs, dans un cadre interactif, correspondant à des sous-ensembles des nombreuses simulations effectuées au cours de la construction, du paramétrage et de la calibration de SimFeodal.

Il est important de noter qu'en l'absence de ces choix de conception de base de données, de la modélisation conceptuelle jusqu'à l'implémentation technique, la plate-forme d'exploration des données SimEDB, que nous allons maintenant présenter plus en détail, n'aurait pu être conçue, élaborée et bâtie de manière convaincante.

5.4 Une plate-forme d'exploration de données de simulations : SimEDB

La section 5.2 (Comment explorer les sorties de SimFeodal ?) a décrit les étapes successives d'avancement dans l'exploration des données en sortie de SimFeodal, depuis l'observation en direct des simulations (« pré-filtrage ») jusqu'au besoin d'une plate-forme permettant l'exploration et la comparaison interactive des sorties de simulation. La plate-forme proposée en réponse à ce besoin, SimEDB⁴⁸, dans un objectif de généricité et d'adéquation, se devait aussi de répondre à de nombreuses contraintes, aussi bien liées aux possibilités offertes qu'à l'usage qui en serait fait. Dans cette partie, nous nous attacherons donc à présenter les contraintes qui ont guidé la conception de SimEDB, ainsi que les choix, méthodologiques et techniques, qui en ont résulté.

5.4.1 Contraintes

5.4.1.1 Adapter la complexité aux utilisateurs

Dans le domaine de l'Interface Homme-Machine (IHM), il est courant de considérer qu'un outil d'analyse et de représentation doit être adapté à un public. La figure 5.13, emblématique de la conception de géovisualisations par Alan MACEACHREN, replace ainsi les types d'usage d'une plate-forme d'exploration selon trois axes : le niveau d'expertise des utilisateurs visés (*users*), le niveau d'interaction souhaité (*interaction*) et l'objectif poursuivi par la (géo)visualisation (*task*). D'après l'auteur, à un niveau d'expertise de l'utilisateur correspond un unique degré d'interaction et un unique objectif : dans le cube, seule une « droite » des usages possibles est présente. L'auteur décompose ces usages en quatre types :

- Pour le grand public (*users* de type *public*), l'objectif est de transmettre une information simple (*info sharing*). Le niveau d'interaction avec la géovisualisation doit donc être faible. Il s'agit d'une tâche de présentation (*present*).
- Pour un public légèrement plus connaisseur, on peut augmenter le niveau d'interaction. On entre alors dans un but de synthèse (*synthesize*).
- En ciblant un niveau encore supérieur d'expertise chez l'utilisateur, et en visant à de la construction de connaissance plus qu'à une transmission de connaissance, on augmente encore le niveau d'interaction. La géovisualisation a alors pour but l'analyse (*analyze*).
- Au plus haut niveau d'interaction, d'expertise et de recherche, la géovisualisation peut servir d'outil d'exploration (*explore*).

48. SimFeodal Exploration DashBoard, voir la note de bas de page 26, section 5.2.6.

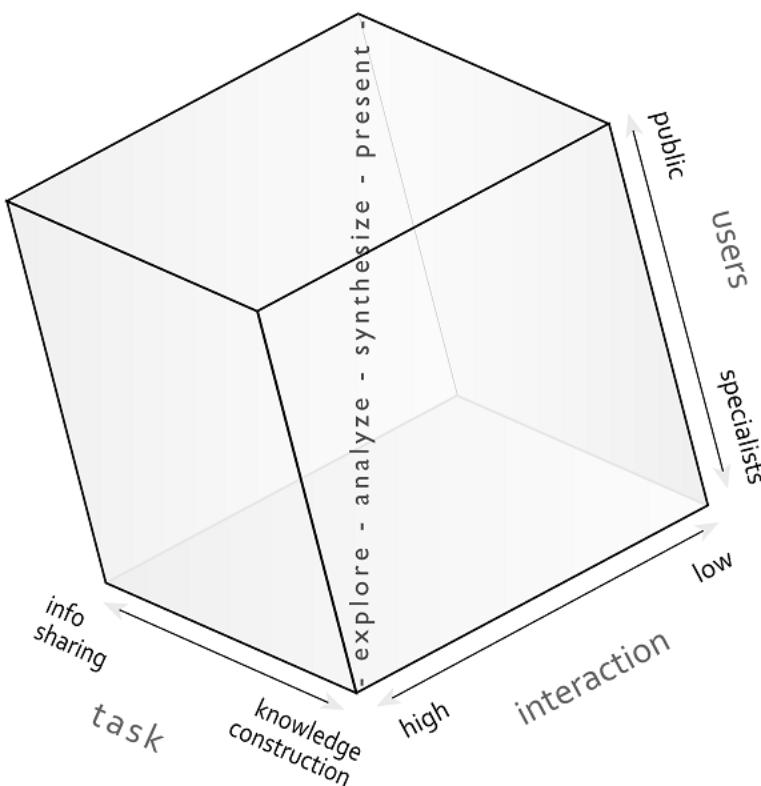


FIGURE 5.13 – « An update to Cartography³, 10 years after its conception », par ÇÖLTEKIN, JANETZKO et FABRIKANT (2018), d'après MACEACHREN et al. (2004, p. 10).

ROTH (2015, p. 16) commente cette figure en effectuant une assimilation entre niveau d’interaction et complexité de l’interface de l’outil de géovisualisation : « All participants agreed that user expertise requires increased interface complexity, as suggested by the Cartography³ framework ».

La plateforme SimEDB est conçue pour être utilisée par des experts thématiques (l’équipe de modélisation de SimFeodal), avec un objectif clairement inscrit dans la construction de connaissance. A ce titre, et d’après MACEACHREN, le niveau d’interaction avec l’outil de géovisualisation devrait être élevé (forte complexité de l’interface pour ROTH) et ancrer l’usage dans une dimension exploratoire.

Des utilisateurs hétérogènes mais captifs. SimEDB est pourtant pensé à un niveau intermédiaire, entre l’analyse et la synthèse, dans le cube de la figure 5.13. Il ne s’agit ainsi pas d’explorer des données, au sens de MacEachren, qui sous-entend par cette exploration (*explore*) la recherche d’informations dans un jeu de données inconnu de l’utilisateur. Le besoin identifié consiste à permettre aux utilisateurs d’explorer des sorties de simulation à travers des indicateurs déjà pensés et constitués. Il ne s’agit pas de proposer un outil d’exploration de données brutes, permettant de créer à la volée des nouveaux indicateurs, via une approche d’exploration « naïve ». Au contraire, l’exploration est guidée par les indicateurs, et la tâche s’apparente plus à de l’analyse de résultats de simulations, voire à de la synthèse des spécificités des résultats issus d’expériences différentes. L’objectif de SimEDB s’écarte donc du « modèle » de MACEACHREN, puisqu’il ne se situe pas sur la « droite » des usages (voir la figure 5.14).

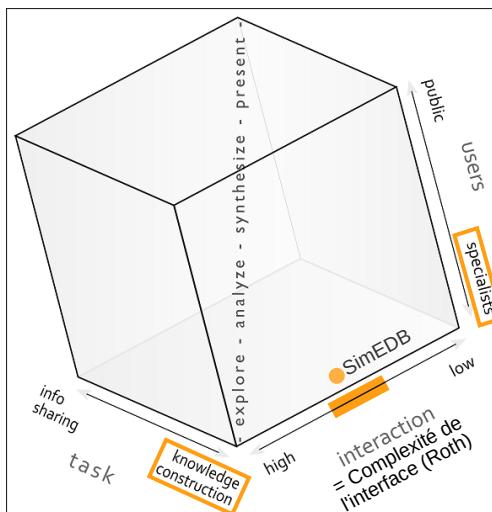


FIGURE 5.14 – Positionnement de SimEDB dans le cube *Cartography³* de MACEACHREN.

Cet écart au modèle conceptuel de MacEachren s'explique notamment par la diversité des utilisateurs de SimEDB. Il serait absurde de qualifier un niveau d'expertise général des utilisateurs tant les spécificités de cette expertise sont nombreuses. Entre des profils de spécialistes thématiques, de modélisateurs ou encore de géomaticiens, l'expertise est présente, mais concernant des champs différents, toutefois tous intéressés par l'exploration des sorties de SimFeodal.

Il est dès lors peu évident de se fixer sur un degré de complexité à atteindre dans la plate-forme d'exploration : un niveau faible serait frustrant pour les utilisateurs avancés, et un niveau avancé serait source de confusion et donc de perte de motivation pour les utilisateurs moins expérimentés (figure 5.15).

Une spécificité du cas d'usage de SimEDB permet toutefois de miser sur une bonne motivation générale des utilisateurs, et donc sur la possibilité de créer un outil à l'interaction plus complexe qu'un simple présentoir de données. Contrairement à une utilisation grand public, qui ne présente aucun engagement vis-à-vis d'une interface d'exploration de données, ou à l'inverse contrairement à des domaines experts où chaque utilisateur dispose de ses propres outils et méthodes pour explorer un jeu de données, le public cible de SimEDB est « captif ». On entend par là que les utilisateurs concernés par SimEDB ne disposent pas d'autre solution que de passer par cette plate-forme pour explorer les données issues de sortie de simulation, en particulier en raison des contraintes liées aux caractéristiques de ces données (leur masse par exemple, voir la section 5.1.4, Des données aux indicateurs). On peut dès lors se permettre de développer une interface plus complexe que si l'on visait un plus large public.

Intuitivitivé de l'usage au regard des applications traditionnelles. En dépit de cette motivation, les utilisateurs de SimEDB demeurent majoritairement des experts thématiciens, potentiellement peu familiarisés à l'exploration de données interactives. Afin que le temps d'exploration des données issues de SimFeodal soit dévoué à la compréhension et à la synthèse de ces données plutôt qu'à un apprentissage ou amélioration en exploration de données, il a été

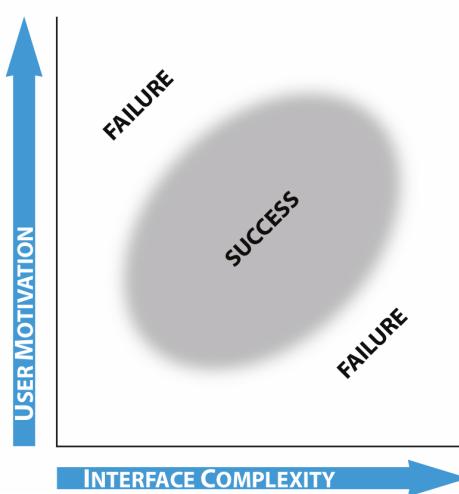


FIGURE 5.15 – « *Interface complexity versus user motivation.* », ROTH (2013, p. 79).

choisi de créer une application aussi simple que possible au regard des fonctionnalités principales qu'elle devait permettre : observer les indicateurs de sortie de simulation pour des expériences données, et les comparer entre elles aussi efficacement que possible.

Il n'était donc pas question de construire un nouveau « logiciel expert », doté de dizaines de fonctionnalités avancées, mais au contraire, de simplifier au maximum l'interface pour ne pas encombrer et complexifier l'utilisation de ces fonctionnalités principales.

On souhaitait une plate-forme aussi épurée que possible, plutôt que de partir sur la personnalisation et l'adaptation d'une solution existante, nécessairement générique et donc difficile à spécialiser.

5.4.1.2 Efficacité

Dans la description du choix du SGBD, on a mentionné une première fois l'intérêt de disposer d'une solution d'interrogation de données qui garantisse une certaine rapidité dans l'exécution des requêtes. Sans entrer dans le détail des recherches en IHM, on peut compléter ce besoin de rapidité par deux aspects complémentaires. Une solution interactive qui minimise les latences permet (1) de motiver l'utilisateur, c'est-à-dire de ne pas le décourager d'utiliser l'application, et (2) de lui faire conserver sa concentration⁴⁹ (*focus*).

Le premier point a été abordé plus haut (section 5.3.1.2), et surtout, en raison de la « captivité » de l'utilisateur évoquée ci-dessus, ne s'applique que marginalement à notre cas d'étude. Des délais trop importants pourraient décourager l'utilisateur, mais en l'absence d'alternative pour explorer les sorties de simulation, cela n'a pas un impact trop important.

Conserver la concentration. Le problème de la concentration de l'utilisateur demeure, lui, critique. Des études ont montré, depuis longtemps (MACKENZIE et WARE 1993), qu'il y avait un lien fort entre la performance d'une interrogation visuelle et le délai nécessaire à son obtention. LIU et HEER 2014, p. 8 montrent ainsi qu'avec un simple délai de 500 millisecondes (ms), la qualité des observations, des généralisations qui peuvent être tirées des données, et des hypothèses émises, décroît nettement chez l'utilisateur. Les auteurs indiquent d'ailleurs que cette diminution est plus importante encore quand l'exploration est effectuée par des actions de *brushing* et de sélections croisées (*linking*), deux méthodes qui sont au cœur de SimEDB : « For example, more aggressive caching or prefetching methods may be employed for operations sensitive to small variations in latency, such as brushing and linking » (LIU et HEER 2014, p. 9).

49. Avant de spécifier ce sujet, notons que quand le délai entre une interaction avec un outil informatique et le retour qu'il doit produire (affichage de graphique par exemple) est important, l'utilisateur perd en capacité d'association entre son action et le retour observé. Typiquement, dans un processus d'exploration de données, plus ce délai est faible, plus l'utilisateur peut mobiliser son intuition pour évaluer, par exemple, les relations entre des variables ou des individus.

FORCH et al. 2017, pour leur part, étudient la perception du délai de réponse lors d'interactions menées avec une souris d'ordinateur. Ils concluent ainsi que les utilisateurs perçoivent des délais d'attente inférieurs à 100 ms, mais notent que les utilisateurs n'en sont pas pour autant perturbés, en particulier ceux qui ont le moins l'habitude de réactions rapides⁵⁰.

Concernant le champ, plus spécifique, des *visual analytics*, nous n'avons pas trouvé d'articles de référence permettant d'établir une comparaison de l'efficacité des résultats trouvés selon la latence de la réponse. Les auteurs de ce champ recommandent largement de prêter attention à la rapidité de rendu et à son optimisation :

« When simple pattern finding is needed, the importance of having a fast, highly interactive interface cannot be emphasized enough. If a navigation technique is slow, then the cognitive costs can be much greater than just the amount of time lost, because an entire train of thought can become disrupted by the loss of the contents of both visual and nonvisual working memories. »

WARE 2012, tiré de AMIRPOUR AMRAII 2018, p. 12.

De manière plus précise, on retrouve une quantification, en termes d'ordres de grandeur, des délais acceptables dans un processus d'exploration de données : « However, due to human cognitive constraints, exploration needs highly responsive system response times [...] : at 500 ms, users change their querying behavior; past five or ten seconds, users abandon tasks or lose attention » (FEKETE et al. 2019, p. 2). Ces auteurs font référence à un billet de blog de Jakob NIELSEN qui donne une justification plus poussée en matière de capacité de concentration.

« When the computer takes more than 0.1 second but less than 1 second to respond to your input, it feels like the computer is causing the result to appear. Although users notice the short delay, they stay focused on their current train of thought during the one-second interval.

[...]

After 1 second, users get impatient and notice that they're waiting for a slow computer to respond. The longer the wait, the more this impatience grows; after about 10 seconds, the average attention span is maxed out. At that point, the user's mind starts wandering and doesn't retain enough information in short-term memory to easily resume the interaction once the computer finally loads the next screen.

More than 10 seconds, and you break the flow. Users will often leave the site rather than trying to regain the groove once they've started thinking about other things. »

NIELSEN 2009.

Selon ces différentes considérations, dans le cadre de SimEDB, on doit

50. Ils remarquent ainsi que les utilisateurs plus habitués à des jeux vidéos rapides (« highly dynamic computer games, such as action games, racing games, or first person shooter games [...] », FORCH et al. 2017, p. 51) sont plus vite affectés par le délai de réponse que les autres.

donc viser à développer une plate-forme aussi rapide que possible. Celle-ci doit donc viser des temps de latence maximale de 10 secondes, tout en sachant, dès le départ, qu'il sera impossible d'arriver aux délais de 100 ms ou 500 ms évoqués précédemment, ne serait-ce que parce que le temps de requête des données – sans compter le temps de rendu graphique – est déjà supérieur d'un ordre de grandeur.

5.4.1.3 Interopérabilité et évolutivité

Une autre contrainte forte tient cette fois au choix de l'environnement informatique qui accueillera la plate-forme d'exploration. On peut résumer ce choix à deux alternatives : un environnement local, en installant l'application sur l'ordinateur de chaque utilisateur, ou un environnement distant, où l'application serait donc accessible à distance, par exemple via une interface web⁵¹. Ce choix a des nombreuses répercussions, aussi bien en matière de possibilité d'accès que de facilité à faire évoluer la plate-forme.

Jusqu'à récemment, le choix le plus classique était de développer une application installable sur un ordinateur : cela permet de garantir une utilisation à tout moment, sans contrainte d'accès au réseau internet. Cela permet aussi d'obtenir de meilleures performances, puisque la rapidité de l'application dépend à ce moment uniquement de la puissance de l'ordinateur, plutôt que de devoir souffrir du passage par l'intermédiaire d'un serveur.

Comme pour le choix du type de SGBD, nous avons cependant préféré nous orienter sur une solution de type distante, pour des raisons d'interopérabilité et d'évolutivité que nous allons décrivons ici.

Différents supports d'interrogation. La performance d'une application locale, par rapport à une application distante, est un atout extrêmement intéressant, comme on vient de le montrer plus haut. Pourtant, cela implique une énorme contrainte : l'application doit être interopérable entre les différents systèmes d'exploitations (*Operating System*, OS) et versions de ceux-ci. Les utilisateurs potentiels de SimEDB, représentation fidèle des acteurs de la recherche, se partagent ainsi entre les trois systèmes d'exploitations majeurs (Windows, MacOs, Linux).

Pour permettre à chacun d'utiliser SimEDB, il faudrait donc que le développement de cette plate-forme soit compatible avec ces différents OS, ce qui est une contrainte considérable en développement logiciel.

Ne mentionnons même pas les nouveaux OS, centrés autour d'usages tactiles, tels qu'on les retrouve sur les tablettes et autres *smartphones*, qui demandent, eux aussi, de nombreuses spécificités de développement.

En somme, disposer d'une application locale universelle, c'est-à-dire uti-

51. Cette question était également posé pour le choix du SGBD en section 5.3.1.1. L'outil d'exploration et l'architecture de données sont cependant indépendants, et le choix d'un stockage des données sur un serveur distant n'implique aucunement que l'application suive la même logique. On peut ainsi avoir un SGBD distant qui serait interrogé par une application locale.

lisable quelque soit le support informatique, est une quasi-impossibilité technique, et un objectif en soit, que notre travail de recherche ne cherche aucunement à résoudre. Pour garantir la faisabilité d'une plate-forme d'exploration de données locale dédiée aux données de simulation de SimFeodal, il faudrait donc commencer par restreindre son champ d'application à un ou deux supports officiels, par exemple l'OS Windows, abandonnant de fait les utilisateurs potentiels ne disposant pas de cette architecture logicielle.

Gérer les mises à jours et modifications. Comme pour les bases de données (« Stockage distribué ou centralisé », section 5.3.1.1), la question de l'application locale ou distante pose un contrainte supplémentaire en matière de maintenabilité et d'évolutivité de la plate-forme choisie. Dans le cadre d'une application locale (correspondant au distribué en SGBD), la distribution des différentes mises à jour de l'application entraînent nécessairement l'installation locale, à chaque fois. Le risque est alors que tous les utilisateurs ne disposent pas d'une même version, ce qui peut entraîner, par exemple, des contradictions dans l'évaluation d'expériences, certains utilisateurs ayant accès à une version proposant des différences dans la manière de calculer ou d'afficher les indicateurs.

Sans aller jusqu'à ces extrêmes, notons qu'avec une application locale, le temps de répercussion d'une modification du code de la plate-forme est plus important : il faut en effet réinstaller sur chaque poste le logiciel ainsi modifié. Cela disqualifie de fait des modifications « en direct », par exemple lors d'une session collective d'exploration des résultats où les utilisateurs auraient des propositions de modifications à faire, ne serait-ce que pour des changements aussi infimes que des titres de graphiques ou d'axes.

Le choix d'une application web. Au contraire, avec une application distante, donc basée sur l'accès, par un navigateur internet, à une application centralisée, ces problèmes ne se posent pas : des navigateurs sont disponibles pour tous les OS existants (OS dédiés aux ordinateurs ou aux usages mobiles), et interprètent de la même manière une page web, indépendamment de leur support de consultation. De plus, comme pour les SGBD, l'usage d'une plate-forme distante permet une répercussion instantanée des mises à jour et corrections : un utilisateur n'a qu'à rafraîchir sa page pour que la dernière version de l'application s'affiche. De la même manière, si un utilisateur souhaite étudier un nouvel indicateur, non prévu auparavant, le temps de déploiement peut être suffisamment court pour que cela soit possible au cours d'une même session d'exploration de données.

Il y a toutefois un désavantage vis-à-vis de solutions entièrement locales, puisque les données permettant l'affichage des indicateurs doivent transiter sur le réseau internet. En cas de connexion lente, l'usage de l'application sera particulièrement difficile, et même impossible en l'absence d'une connexion.

Cette lenteur relative est toutefois compensée par un avantage de la centralisation de l'application : les calculs, parfois lourds, ne reposent pas sur les capacités individuelles des ordinateurs clients. En installant l'application sur

un serveur dédié, il suffit donc d'augmenter les caractéristiques de celui-ci pour que les performances soient améliorées pour chacun des utilisateurs de l'application.

Dans le cas de SimEDB, nous disposons de ressources informatiques largement suffisantes⁵² pour assurer une rapidité de traitement des données et ainsi permettre à l'application SimEDB de se dégager de ce « goulot d'étranglement » technique qu'aurait sinon éprouvée la plate-forme.

5.4.1.4 Généricité de l'interrogation et indépendance vis-à-vis des données

La dernière contrainte, plus technique, tient au besoin de généricité d'une plate-forme d'exploration de données vis-à-vis des données qu'elle interroge. On a résumé les possibilités et choix effectués en matière de SGBD (section 5.3.1 : « Assurer la capacité d'interrogation des données »), et décidé de ne retenir que des SGBD permettant une interrogation standardisée via des connecteurs génériques et un langage universel (le SQL).

L'infrastructure de stockage et d'organisation des données a ainsi été conçue pour être aussi générique que possible. Encore faut-il que la plate-forme d'exploration de données soit elle aussi aussi générique que possible, et donc en mesure de profiter de l'universalité du SGBD choisi.

Indépendance vis-à-vis du support de données. Une contrainte forte est donc constituée par la capacité de la plate-forme à être indépendante de la source des données : quelque soit le SGBD choisi, les requêtes émises par la plate-forme doivent être les mêmes, sans requérir d'adaptations spécifiques en dehors de la désignation du lieu de stockage des données et des pilotes du SGBD.

Dans les faits, lors de la construction de SimEDB (cf. section 5.2 : « Comment explorer les sorties de SimFeodal ? »), plusieurs solutions de stockage de données ont été employées successivement, au fur et à mesure des limites rencontrées chez chacune. Depuis les premières implémentations des rapports automatiques jusqu'à l'utilisation de SimEDB dans son état actuellement discuté, les données de sorties de simulation ont ainsi été tour à tour interrogées depuis de simples fichiers CSV au départ jusqu'au SGBD ultra-performant MapD, en passant par des solutions intermédiaires plus classiques (SQLite et MonetDB notamment).

Il n'était donc aucunement question d'avoir à adapter le code source des programmes permettant de générer les indicateurs depuis les données, mais au contraire, de s'assurer d'utiliser des bibliothèques logicielles indépendantes des données, c'est-à-dire capables d'exécuter les mêmes chaînes de traitements quelle que soit la provenance des données.

52. En nous appuyant dans un premier temps sur un serveur de calcul interne à l'UMR Géographie-cités, puis sur un serveur de calcul partagé mis à disposition par la « Très Grande Infrastructure de Recherche » Huma-Num ensuite.

On peut expliciter ce propos à l'aide de l'exemple caricatural des logiciels de type tableurs. Dans ce type d'application, on peut écrire des programmes (les « macros ») qui permettront l'ouverture d'un fichier CSV et effectueront des calculs dessus pour en tirer par exemple des résumés. Dans ce même tableur, on peut aussi faire appel à des sources de données différentes (bases de données Access ou SQL par exemple), mais les programmes (macros) seront alors à réécrire en quasi-totalité pour les adapter aux différences de sources de données.

Dans notre cas, les sources de données ayant très largement évolué au cours du temps, on ne pouvait faire reposer notre application sur une plate-forme qui demande une adaptation forte à la provenance des données, comme c'est le cas des tableurs. Il était donc nécessaire de s'appuyer sur des environnements logiciels (les bibliothèques logicielles) permettant une forte générnicité vis-à-vis des sources de données.

Indépendance vis-à-vis des requêtes et modularité de l'implémentation. Pour garantir cette générnicité, il est donc nécessaire de s'assurer que le mode de communication de la plate-forme vers les données soit bien basé sur un langage universel : le SQL. Il convient donc de choisir un ensemble de technologies permettant de générer des requêtes SQL, quand bien même l'expression de ces requêtes elles-mêmes serait conçue dans un autre langage. Pour les requêtes complexes, le SQL tend en effet à être peu lisible, les opérations s'emboîtant les unes dans les autres de manière très linéaires, et donc, souvent verbeuses. En SQL pur, il est donc peu évident de créer une implémentation modulaire d'une requête, c'est-à-dire permettant une factorisation des commandes et un paramétrage des entrées.

Les indicateurs de sortie de SimFeodal sont, on l'a vu, assez fréquemment basés sur le même type d'opération : on observe par exemple souvent l'évolution du nombre d'agents d'un certain type (agrégats, foyers paysans...) au cours du temps. Dans le cas de cet exemple, en SQL, pour spécifier une requête permettant de récupérer le nombre de foyers paysans au cours du temps, groupés par année et avec un filtre sur certaines simulations, il ne faut que quelques lignes de code. Pour que cette requête devienne générnicie, c'est-à-dire indépendante du type d'agent qui en deviendrait un argument, il est nécessaire d'y ajouter de nombreuses lignes de code. Cela revient potentiellement à doubler, pour chacun des indicateurs, la longueur du code-source requis pour l'expression des requêtes, et bien sûr à les rendre plus complexe à modifier et corriger. De plus, les modes d'expression qui permettent de modulariser du code SQL peuvent varier fortement selon les SGBD choisis, n'étant pas strictement décrits dans les normes SQL. Par exemple, la déclaration d'une variable, par exemple pour paramétrier le nom de la table contenant les agents, est très différente dans les deux SGBD les plus utilisés (MySQL et PostgreSQL).

Faire appel à un langage intermédiaire, générant du SQL en sortie depuis une entrée sous forme d'un « *Domain Specific Language* » (DSL) permet ainsi de bénéficier d'une part de l'universalité du SQL, et d'autre part, d'une syntaxe plus expressive que celle du SQL. En utilisant un DSL, plus adapté à la manipulation de données qu'à la sélection de sous-ensembles, on gagne donc en

modularité d'implémentation , et donc en ré-utilisation de fonctions plus génériques, ce qui permet de disposer d'un code-source plus robuste, ré-utilisable et évolutif.

Conclusion : Vers une plate-forme web générique et intuitive

Dans cette sous-partie, nous avons présenté les principales contraintes qui ont orienté le choix des cadres méthodologiques et techniques utilisables pour concevoir une plateforme telle que SimEDB.

En premier lieu, on fait le choix de se tourner vers une plate-forme implémentée sous forme d'application web, utilisable depuis un simple navigateur – donc inter-opérable entre les différents supports technologiques –, ce qui exclue de fait quantités d'outils, de logiciels et de bibliothèques logicielles pensées pour l'exploration interactive de données.

On souhaite de plus que la plate-forme utilisée dispose d'une interface aussi épurée que possible, donc nécessairement très adaptée au cas particulier des données issues de simulation que l'on manipule. Là encore, l'étendue des possibles est restreinte, éliminant l'ensemble de solutions « clefs-en-main », par exemple conçues autour des « webSIG » ou de bibliothèques logicielles de visualisations interactives intégrées.

L'utilisation de la plate-forme doit être aussi efficace que possible, en cherchant à minimiser les temps de latence entre sélection interactive et affichage des indicateurs en résultant. On devra donc privilégier des ensembles technologiques récents et performants, intrinsèquement dédiés à l'interactivité, au détriment de *frameworks* plus génériques.

Enfin, il faut que cette solution, dans la mesure du possible, soit en mesure de proposer une syntaxe d'interrogation de données modulaire, factorisée, et plus expressive que le SQL sur lequel elle doit toutefois s'appuyer.

Ces contraintes sont des éléments génériques à prendre en compte dans la conception d'un outil d'exploration de données, et elles dépassent largement notre seul cas d'utilisation. Nous n'avons pour autant pas tenté de dresser un paysage complet des contraintes potentielles, liées aux différents usages possibles, qui peuvent guider les choix techniques et méthodologiques de la conception d'un outil. La relative spécificité de SimEDB tient à la combinaison des contraintes identifiées et à la combinaison des choix effectuées pour les dépasser, que nous allons maintenant expliciter.

5.4.2 Construire une plate-forme interactive pour l'exploration de sorties de simulation

Dans cette dernière sous-partie, nous allons donc présenter les choix – techniques, esthétiques et interactifs – qui ont été adoptés dans la conception et l'implémentation de SimEDB. Nous les présentons ici de manière linéaire, dans l'ordre quasi-chronologique du développement, mais il est important de garder en considération que ces éléments sont intimement intriqués. Un choix technique, par exemple, peut conditionner les types d'interactions possibles, parce que l'utilisation de telle méthode d'interaction peut n'être proposée que dans tels et tels environnements logiciels.

Notons enfin que l'application SimEDB présentée ici, aussi bien dans son usage que dans sa conception, représente un instantané de développement, qui correspond à la période de rédaction du présent chapitre : à l'instar d'un modèle, une plate-forme peut et doit évoluer pour s'adapter aux besoins de ses utilisateurs tant qu'elle est utilisée. Les technologies et choix esthétiques introduits n'ont pas toujours été présents, et auront sans doute à évoluer dans la suite de la « durée de vie » de SimEDB. Pour les raisons évoquées en termes de facilité de mise à jour d'une solution distante, cela ne pose toutefois aucun problème vis-à-vis de l'utilisation de la plate-forme, largement indépendante, en matière de temporalités, du présent ouvrage.

5.4.2.1 Choix des technologies

Nous présentons ici les technologies mobilisées dans le cadre du développement de SimEDB. Le but n'est pas d'entrer dans les détails de l'implémentation⁵³, mais bien de justifier et présenter les choix relatifs aux technologies employées, en restant à un niveau assez général⁵⁴. Il nous paraît important d'entrer dans ces choix qui relèvent plus de la technique que de la méthodologie en ce qu'ils concourent de la volonté de reproductibilité de la thèse, et particulièrement de la reproductibilité de la démarche, conceptuelle et méthodologique, mise en place. Nous portons la conviction que l'ensemble de technologies assemblées ici dans notre « chaîne de traitement » est très largement ré-utilisable, dans le cadre d'adaptations à d'autres cas d'études, mais aussi et surtout, pour une multitude de problématiques requérant une analyse visuelle de données massives ([on y reviendra dans le chap 7](#)).

Technologies webs « natives » et adaptativité. Au cours de la dernière décennie, les interfaces physiques de consultation de médias informatiques se sont largement diversifiées. Cela a provoqué une hétérogénéisation importante aussi bien des modes d'interaction (dispositifs « tactiles ») que des modes d'affichages (les tailles et résolutions des écrans n'ont jamais été aussi diverses et imprévisibles).

53. Le code source de SimEDB – et l'historique de son versionnement – sont, pour cela, disponibles en ligne sous licence libre, sur la plate-forme Github : github.com/RCura/SimEDB

54. À ce titre, les quelques lignes de codes présentes par la suite servent un but illustratif et descriptif, et nous semblent remplir ce rôle bien plus efficacement que n'importe quel schéma structurel ne le pourrait.

En conséquence, les normes de présentations graphiques ont évolué, vers plus d'« adaptativité », en particulier avec l'avènement du « responsive web design » (« conception de sites web adaptatifs ») qui permet de prévoir efficacement l'agencement d'une page web quelque soit le support de consultation.

Les technologies qui prédominaient dans la réalisation d'applications web interactives il y a quelques années⁵⁵ ont largement disparu suite à un manque d'adaptation à ces nouveaux support.

Pendant ce temps, de nouveaux standards du développement web (HTML5 entre autre) ont émergé et atteint un niveau de maturité suffisant pour remplacer l'ensemble des possibilités (et les étendre) proposées par ces anciens environnements trop monolithiques.

Ces technologies, aujourd'hui indispensables, reposent sur des codes standardisés, verbeux et peu explicites⁵⁶, mais toutefois assez universellement interprétables par les navigateurs. Pour pallier à leur faible expressivité, on peut faire appel à des *frameworks* graphiques qui en simplifient l'usage : comme les DSL évoqués plus haut, ce sont des ensembles de bibliothèques logicielles qui génèrent à l'aide d'instructions courtes et simples les centaines de lignes de codes nécessaires à l'affichage interopérable, universel et constant d'un site ou d'une application web.

Nous avons donc fait le choix de nous concentrer sur des environnements standardisés, capables de générer du HTML (« *HyperText Markup Language* »), lui-même mise en forme à l'aide de styles CSS (« *Cascading Style Sheets* ») et rendu interactif par du code JavaScript.

À ce titre, le framework Bootstrap⁵⁷ s'est révélé extrêmement utile dans le *design* de l'interface de SimEDB (et des versions précédentes), tant il simplifie l'expressivité d'une mise en page à l'aide d'une grille graphique et de composants interactifs ré-utilisables.

Le choix d'environnements de développement intermédiaires.⁵⁸ Pour construire des applications interactives en ligne, de multiples choix sont possibles, et on peut les catégoriser selon le niveau de développement qu'ils demandent. Par exemple, il est tout à fait possible de s'appuyer sur des briques logicielles de bas niveau (ce que l'on appelle communément *framework*), et de développer à partir de celles-ci toute l'interface et le fonctionnement d'une application.

Cette approche, majoritaire dans la construction d'applications actuelles (avec des *frameworks* basés sur le langage JavaScript tels que ReactJS ou AngularJS,

55. Applications en Flash, applets Java...

56. Il suffit de consulter le code-source d'une page web contenant des visualisations interactives pour le constater. Les assemblages de langages SVG, CSS et JavaScript sont ainsi assez largement indéchiffrables pour qui n'en est pas un spécialiste.

57. <http://getbootstrap.com/>

58. Ne pas oublier, dans le positionnement (chap1) de consacrer au moins un paragraphe (ou encadré) au choix « militant » de ne se tourner QUE vers des outils libres, sans exception.

ou encore sur le langage Python tels que Django ou Flask), est extrêmement flexible et performante, au prix d'un développement important. Un *framework* fournit en effet des « briques » logicielles de base – les composants –, très génériques. Ces composants de bases demandent donc une forte personnalisation et un agencement complexe afin d'arriver au résultat souhaité. La communication entre ces composants doit être entièrement prévue et implémentée, et on abouti donc nécessairement sur des projets assez importants, qui demandent une réelle expertise en développement et portent le risque d'être trop complexes pour être facilement adaptés et donc rendus génériques.

À l'autre bout du gradient de développement, on peut aussi choisir de bâtir une application à partir d'un ensemble logiciel intégré, comme Tableau, qui permet d'agencer visuellement et graphiquement des composants graphiques et leurs liens. Ces outils, très usités en informatique décisionnelle, sont extrêmement simples à prendre en main, y compris pour des « utilisateurs finaux » – analystes par exemple –. En contre-partie, ils sont moins personnalisables et configurables que des solutions plus bas niveau comme les *frameworks*, et ce sont majoritairement des logiciels propriétaires, donc non modifiables.

Entre ces deux extrêmes, quelques *frameworks* intermédiaires, souvent originaires des outils de manipulation de données plus que du monde de l'informatique décisionnelle, mettent à disposition de l'utilisateur des composants de plus haut-niveau que les « briques élémentaires ». L'interaction entre les composants y est déjà pré-conçue, tout en reposant sur une construction « depuis zéro », donc personnalisables et adaptables.

Généralement, chaque *framework* est associé à un langage de programmation (voir tableau 5.2) : le *framework* Shiny s'appuie sur le langage R, Dash sur le langage Python et Escher sur le langage Julia.

Framework	Shiny	Dash	Bokeh	Escher	Observable
Référence	CHANG et al. 2015	PLOTLY 2017	BOKEH 2014	GOWDA 2018, d'après BEZANSON et al. 2014	BOSTOCK 2018
Langage	R	Python	Python	Julia	JavaScript / D3.js
Maturité	++ (2012)	- (2017)	+	↔ (2016)	+((2017) (D3 : 2011)
Communauté	++	↔	+	-	+
Connaissance personnelle	++	-	↔	-	-

TABLEAU 5.2 – Une sélection de différents *frameworks* dédiés à la création d'interfaces d'exploration de données.

Le choix de tel ou tel framework dépend certes de la maturité de chaque projet – Shiny est à ce titre très en avance –, mais surtout du langage informatique que le concepteur de l'application souhaite utiliser. Dans le cas de SimEDB, le créateur de la plate-forme est adepte du langage R (voir COMMENGES et al. 2014) et pratique le *framework* Shiny depuis plusieurs années (voir CURA 2015) : le choix d'utiliser ce *framework*, au sein d'un environnement logiciel

basé sur le langage R, était donc assez évident.

Manipuler les données avec R et dplyr. Les langages de programmation, et en particulier les plus utilisés en analyse de données, reposent souvent sur une architecture logicielle modulaire. Le langage constitue un cœur, autour duquel des bibliothèques logicielles (des *packages* en R) viennent ajouter des fonctionnalités. Parmi ces bibliothèques logicielles, en Python comme en R, certaines sont entièrement dédiées à la manipulation de données tabulaires – on parle alors de « Data Manipulation Language » (DML) – et permettent d'effectuer des traitements avec des approches fonctionnelles, plutôt qu'avec les structures impératives plus fréquemment utilisées en programmation. En R, ces *packages* constituent de véritables écosystèmes, dotés de leur propre DSL (voir p. 230) et donc d'une grammaire de manipulation de données propre.

L'un de ces *packages*, *dplyr* (WICKHAM et al. 2015), s'inscrit dans un écosystème dénommé tidyverse (WICKHAM 2017), et permet ainsi de chaîner des opérations de manipulation de données en une chaîne de traitement complète, plutôt que de faire appel aux habituelles boucles de parcours de matrices propres aux langages de programmation classiques. Ce faisant, avec des opérations chaînées, qui reposent sur des « verbes » permettant d'effectuer des traitements de restructurations, de modification, de filtrage ou d'enrichissement d'une donnée tabulaire⁵⁹, on obtient un ensemble d'instructions qui forment une « phrase » de manipulation de données, exprimées donc dans la « grammaire de traitement de données » fournie par *dplyr*.

Cette « grammaire » s'inspire notamment du SQL, bien que beaucoup plus complète, et peut en particulier être « convertie » en SQL (figure 5.16), c'est-à-dire qu'une suite d'instructions exprimées via *dplyr* en R (figure 5.16a) peut être traduite en SQL (figure 5.16b), et donc envoyée et exécutée sur un SGBD.

En matière de performance, l'approche de *dplyr* est intéressante : toutes les opérations sont effectuées par le SGBD directement, et seul le résultat final est renvoyé à R (instruction `collect()`). Le traitement de données bénéficie donc de la rapidité d'exécution du SGBD MapD, tout en profitant de la syntaxe expressive de *dplyr*. De plus, cela permet de minimiser les transferts de données : en exécutant les calculs dans le SGBD, il n'est besoin que d'en renvoyer le résultat à l'utilisateur. Et ce résultat est nécessairement moins lourd que les données dont il provient. On optimise ainsi l'utilisation de bande-passante internet.

59. Les fonctions de base sont donc des « verbes », au sens où elles définissent les opérations qui seront effectuées sur les données. On peut ainsi isoler des colonnes avec le « verbe » `select`, filtrer les lignes avec `filter`, modifier une colonne avec `mutate` etc. La figure 5.16a en donne un exemple commenté et concret.

```
NombreAggregatParAnnee <- tbl(conMapD, "agregats") %>% # Connexion à la table agregats de la BDD
filter(sim_name == "5_0") %>% # Filtre de la table en ne conservant que les expériences "5_0"
group_by(sim_name, seed, annee) %>% # Agrégation sur les identifiants de simulation (seed et sim_name) et par année
summarise(NbAggregats = n()) %>% # Calcul du nombre total de lignes pour chaque agrégation
arrange(sim_name, seed, annee) %>% # Tri de la table selon les trois variables
collect() # Récupération du résultat de la requête en mémoire
```

(A) Code source R avec le package dplyr

```
SELECT "sim_name", "seed", "annee", COUNT() AS "NbAggregats"
FROM "agregats"
WHERE ("sim_name" = '5_0')
GROUP BY "sim_name", "seed", "annee"
ORDER BY "sim_name", "seed", "annee"
```

(B) Traduction du code source dplyr en SQL

FIGURE 5.16 – Un exemple de manipulation de données stockées dans un SGBD depuis R.

On y interroge la table des agrégats de population pour calculer le nombre moyen d'agrégats par année de simulation.

Création de graphiques avec ggplot2 et la « grammar of graphics ». En interrogeant le SGBD avec des outils adaptés, on obtient un jeu de données qui servira de base à la représentation graphique des indicateurs (figure 5.17, étape 1). On peut passer alors passer à l'étape de construction graphique des indicateurs. Il existe pour cela, toujours en restant de l'environnement (et du langage) R, de nombreux packages dédiés.

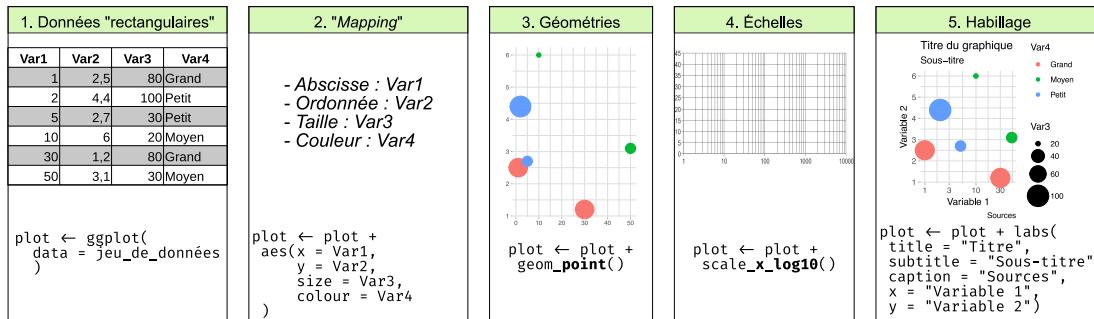


FIGURE 5.17 – Représentation des éléments de grammaire de ggplot2, d'après une idée de HEALY (2018).

L'un des packages les plus utilisés, ggplot2 (WICKHAM 2016), met en œuvre une syntaxe assez adaptée à nos contraintes : ce package est conceptuellement fondé sur la « grammar of graphics », c'est-à-dire une vision modulaire et très structurée de la conception graphique, pensée par Leland Wilkison (WILKINSON 2006). La logique, assez familière pour un utilisateur de Systèmes d'Information Géographique (SIG), consiste à penser une représentation graphique comme un ensemble de couches (*layers*), qui se superposent, se complètent, et sont toutes basées sur une source de données. Les différentes composantes des données (variables par exemple) sont associées à des composantes graphiques de base (abscisse, ordonnée, taille, couleur ...), formant ainsi une mise en correspondance (*mapping*) des données avec les composants graphiques (voir figure 5.17, étape 2).

Dans notre cas, cette grammaire est porteuse d'un avantage majeur. Elle est extrêmement structurée et modulaire. Cela permet de ré-utiliser largement

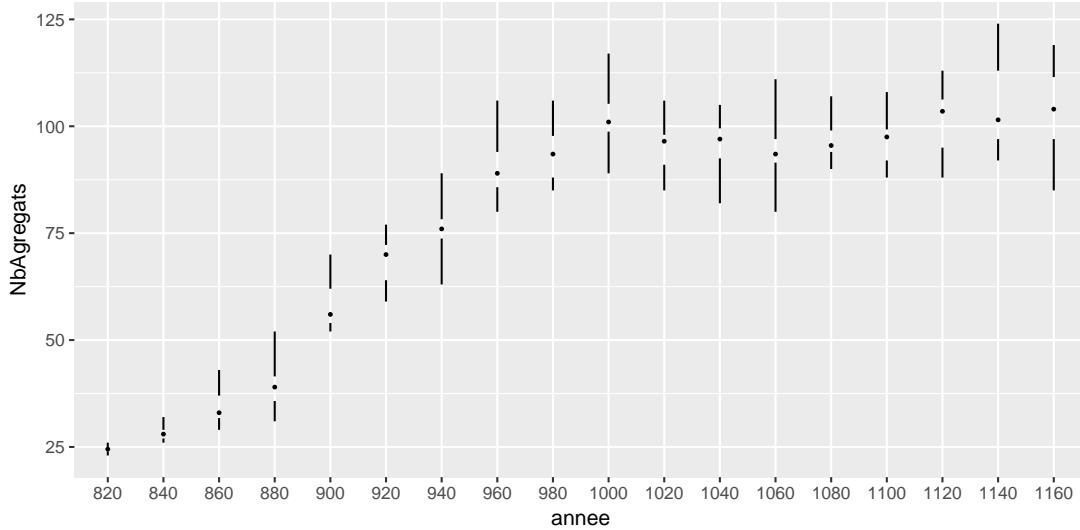
les codes-sources écrits pour un indicateur et de les adapter aisément à d'autres indicateurs. Si la grammaire du graphique est bien définie, elle sera ainsi très indépendante du contenu des données que l'on y insère.

Par exemple, de nombreux indicateurs de sortie de SimFeodal décrivent l'évolution du nombre d'agents au cours des années de simulation (les agrégats dans la figure 5.18). Ce type de graphique est d'une part rapide à produire avec ggplot2 : il ne requiert que quelques lignes de code (figure 5.18a). D'autre part, en changeant le tableau de données en entrée (créé dans figure 5.16a), on reproduit exactement le même type de graphique pour, par exemple, un autre type d'agent (le nombre de foyers paysans, d'églises...).

Le *package* ggplot2 répond tout à fait aux contraintes de modularité exposées plus haut, et permet de factoriser le code-source, ce qui garantit une maintenance plus rapide et une meilleure robustesse de l'application dans son ensemble.

```
ggplot(NombreAggregatParAnnee) + # Création d'un graphique avec le jeu de données NombreAggregatParAnnee
  aes(x = annee, y = NbAggregats) + # "Mapping" des valeurs : champ "annee" en x, champ "NbAggregats" en y
  geom_tufteboxplot() # Ajout d'une couche graphique de type boxplot minimalistique (Tufte boxplot)
```

(A) Code source R avec le *package* ggplot2



(B) Graphique généré

FIGURE 5.18 – Un exemple de production de graphique avec ggplot2.

Fluidifier les étapes de rendu : le « pipeline de visualisation ». Dos SANTOS et BRODLIE (2004) ont conceptualisé et schématisé l'ensemble des étapes nécessaires à la construction d'une visualisation, depuis les données brutes jusqu'à l'image finale, au sein d'un « *pipeline* » de la visualisation (figure 5.19). Ils y décrivent les différents états des données en entrée et en sortie (ligne supérieure), ainsi que les traitements que ces données subissent (ligne inférieure).

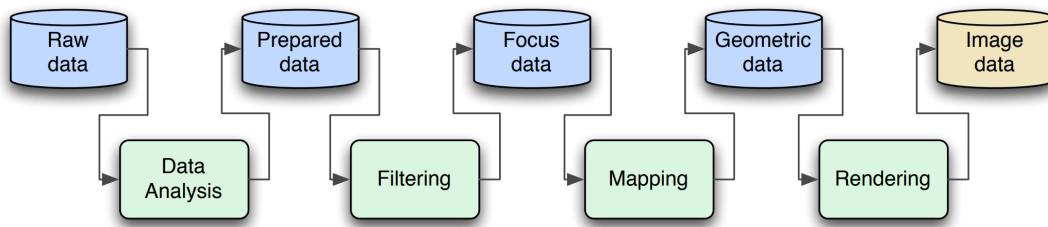


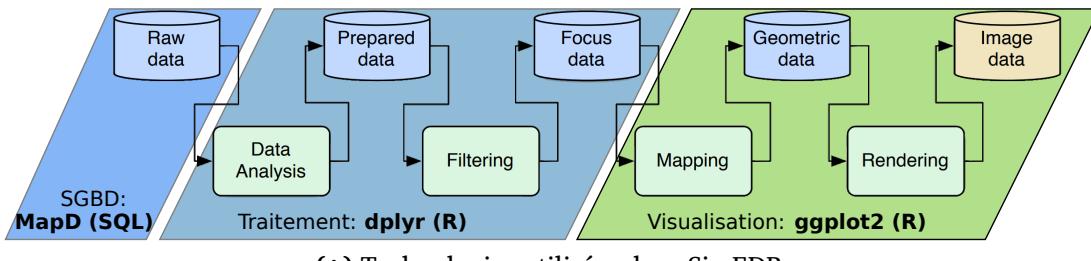
FIGURE 5.19 – « The Visualisation Pipeline », de KEIM et al. (2010, p. 92), d'après DOS SANTOS et BRODLIE (2004, p. 314)

Ce *pipeline* débute par des données brutes (*raw data*) auxquelles ont fait suivre un traitement (*data analysis*, par exemple une agrégation) pour obtenir des données prêtes à l'utilisation (*prepared data*). Il s'agit ensuite de filtrer ces données (choix des expériences à conserver par exemple), dont l'on conserve donc uniquement les éléments nécessaires (*focus data*). Par une étape de mise en correspondance des variables et des primitives graphiques (*mapping*, voir paragraphe précédent), on obtient un jeu de données « géométriques » (*geometric data*). Cette « géométrie » est à entendre au sens de l'espace de la représentation graphique, qui comprend par exemple les coordonnées des points, lignes, la couleur des cercles et autres éléments mobilisés dans la construction d'un graphique. Il n'est donc aucunement question ici de données géographiques ou spatiales. La dernière étape est plus technique : il s'agit du « rendu graphique » (*rendering*), qui convertit un ensemble de spécifications géométriques (textuelles) en une image affichable, faite de pixels (*image data*).

Dans la chaîne de traitement la plus classique, ces étapes s'effectuent au sein de différents logiciels, chacun dédiés à une tâche. Dans le domaine des utilisateurs de SIG, on retrouve par exemple fréquemment une préparation des données dans un tableur, un import dans un logiciel SIG qui va être chargé de la cartographie, puis un export vers un logiciel de dessin vectoriel afin de réaliser la mise en page. À chaque changement de logiciel, il est nécessaire d'exporter les données produites, puis de les ré-importer dans le logiciel suivant.

A contrario, le propre de l'utilisation d'un langage de programmation plutôt que d'un outil graphique est de pouvoir automatiser et intégrer l'ensemble de ces étapes. L'utilisation de R comme langage de développement de SimEDB nous permet ainsi de développer une unique chaîne de traitement, qui ne requiert aucun import/export de données, et peut donc être consolidée, vérifiée et surtout ré-employée *ad libitum*.

L'enchaînement des *packages* employées dans SimEDB est présenté dans la figure 5.20a, et le code-source correspondant à l'exemple développé dans cette sous-partie dans la figure 5.20.



```

tbl(conMapD, "agregats") %>% # Connexion à la table agregats de la BDD
filter(sim_name == "5_0") %>% # Filtre de la table en ne conservant que les expériences "5_0"
group_by(sim_name, seed, annee) %>% # Agrégation sur les identifiants de simulation (seed et sim_name) et par année
summarise(NbAggregats = n()) %>% # Calcul du nombre total de lignes pour chaque agrégation
arrange(sim_name, seed, annee) %>% # Tri de la table selon les trois variables
collect() %>% # Récupération du résultat de la requête en mémoire
mutate(annee = factor(annee)) %>% # Conversion du champ "annee" de numérique à facteur
ggplot() + # Création d'un graphique avec le jeu de données créé jusque-là
aes(x = annee, y = NbAggregats) + # "Mapping" des valeurs : champ "annee" en x, champ "NbAggregats" en y
geom_tufteboxplot() # Ajout d'une couche graphique de type boxplot minimaliste (Tufte boxplot)

```

(B) Implémentation d'un exemple de pipeline de visualisation pour construire un indicateur dans SimEDB

FIGURE 5.20 – Le « pipeline » de visualisation et son implémentation dans SimEDB.
Cette implémentation est obtenue en assemblant les codes des figures 5.16a et 5.18a.

Modulariser les fonctions. Shiny, en tant qu'outil de création d'interface graphique, bénéficie aussi d'un avantage important en matière de conception d'application web : comme ce package est basé sur un langage de programmation modulaire, on peut logiquement créer et ré-utiliser des « briques d'interfaces » modulaires. Par l'utilisation de modules⁶⁰, il est possible de définir un ensemble d'éléments graphiques adaptatifs et de ré-utiliser tel quel cet ensemble.

Dans l'interface de SimEDB (figure 5.21), par exemple, les indicateurs graphiques sont toujours présentés de la même manière (encadrés oranges) : dans la partie de droite relative aux indicateurs, l'indicateur à proprement parler est à gauche, et des outils de téléchargement (vectoriel et image) et de notation de l'indicateur (les étoiles) sont placés en haut à droite.

En termes de code-source, la manière de produire les deux indicateurs comparés dans la figure 5.21 est strictement identique : c'est une fonction générique qui prend en entrée des données et un type de graphique à produire. Dans la figure, seul un paramètre varie : le filtre appliqué aux données, qui renvoie ici à différentes expériences. Cela permet donc d'une part de minimiser la taille du code, mais surtout, avec la générnicité apportée, de faciliter de manière considérable l'ajout ou la modification d'indicateurs.

60. <https://shiny.rstudio.com/articles/modules.html>

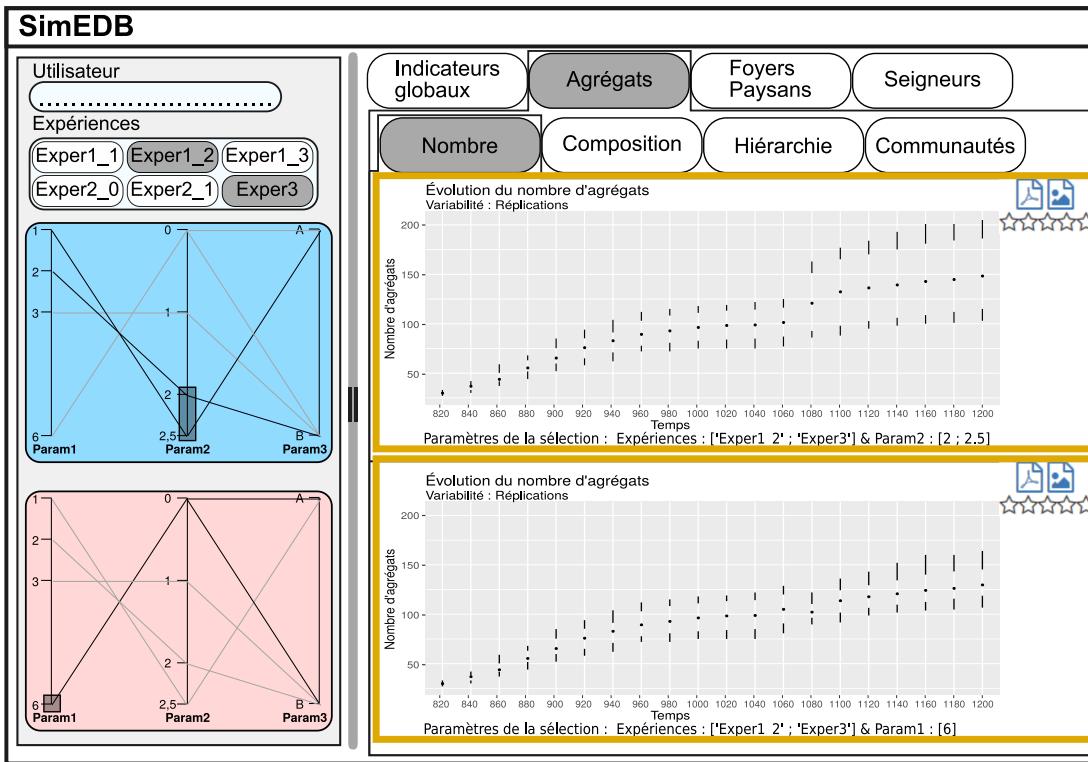


FIGURE 5.21 – Une conception modulaire.

Les deux éléments graphiques encadrés sont créés par un même « module » dont les arguments varient. Ici, l’argument est constitué par les expériences sélectionnées : on le visualise dans les graphiques en coordonnées parallèles (gauche) et dans la partie inférieure des des graphiques (texte « Paramètres de la sélection »).

N.B : À partir de cette figure, on représente l’interface de SimEDB à l’aide d’un mockup plutôt que de captures d’écrans, pour en simplifier la compréhension.

5.4.2.2 Choix de l’organisation visuelle

Les différentes étapes de construction d’une plate-forme d’exploration (section 5.2 : Comment explorer les sorties de SimFeodal ?) ont conduit à une organisation sous forme de *dashboard* interactif. La forme de ce *dashboard* a évolué tout au long de l’apparition de nouveaux besoins, pour aboutir sur une organisation mono-page, pensée autour de la consultation d’indicateurs de sorties, qui devaient permettre de comparer des expériences différentes sélectionnées au moyen de graphiques en coordonnées parallèles.

Le choix d’un outil dédié à la comparaison, plus qu’à la visualisation des résultats d’un unique ensemble de simulations, entraîne nécessairement des répercussions en matière de présentation visuelle – d’interface graphique – des éléments permettant de mener cette comparaison. Depuis la première plate-forme aboutie – SimVADB (figure 5.7, reprise ici en figure 5.22a) –, l’interface graphique a fortement évolué par conséquent (figure 5.22b).

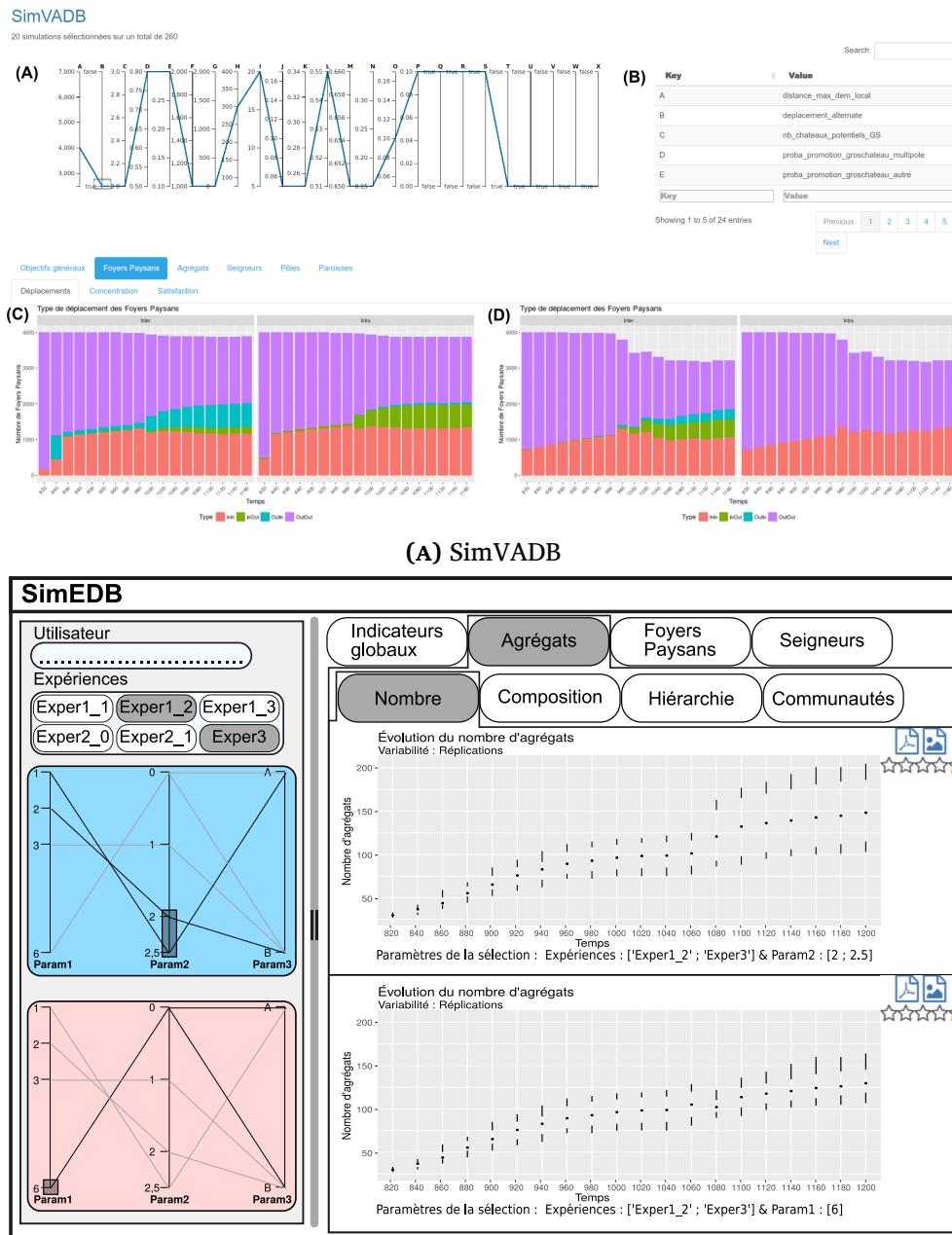


FIGURE 5.22 – Comparaison visuelle de SimVADB (a) et SimEDB (b).

Une comparaison verticale. Le premier changement tient à la disposition des « contrôleurs », c'est-à-dire aux composants de l'interface sur lesquels l'utilisateur peut jouer pour choisir les expériences qui seront affichées. Dans SimVADB, le seul contrôleur était un graphique en coordonnées parallèles interactif, situé dans le haut à gauche de l'interface (figure 5.22a, partie (A)). Celui-ci permettait de régler le choix des expériences présentées dans l'indicateur de droite (D), celui de gauche (C) étant constitué d'une moyenne de l'ensemble des expériences.

Dans SimEDB, on a déjà expliqué le choix de permettre une double sélection, c'est-à-dire de régler les deux sous-ensembles de simulation à comparer. Par conséquent, la barre des contrôleurs (encadré orange dans la figure 5.23) est désormais constitué de deux graphiques en coordonnées parallèles interactifs (en bleu et en rouge), qui agissent sur les indicateurs présentés à leur droite.

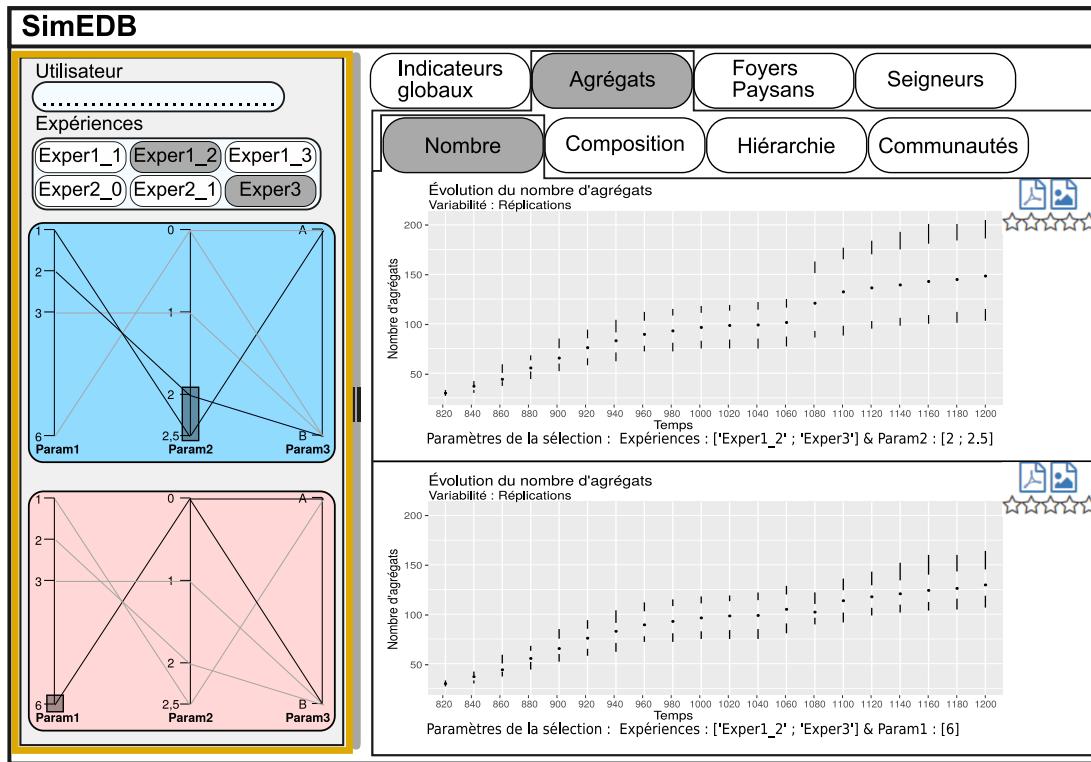


FIGURE 5.23 – La barre de contrôleurs (encadrée en orange) dans l’interface de SimEDB.

En raison de ces composants supplémentaires dans l’interface, on a choisi d’en changer la disposition. Les contrôleurs sont désormais situés à gauche et les indicateurs à droite, alors qu’ils étaient superposés dans SimVADB.

Ce choix de re-disposition tient à deux arguments. En premier lieu, en termes d’occupation de l’espace visuel on peut noter que les indicateurs graphiques sont toujours plus larges que haut. Cela s’explique notamment de manière thématique, en ce que la variation temporelle, souvent présentée en abscisse, est plus importante que les valeurs attributaires, en ordonnée : les indicateurs de ce type s’analyse plus de manière relative, en observant leur évolution, que de manière absolue. L’occupation de l’espace visuel est donc mieux employée en superposant les indicateurs : cela permet d’augmenter la taille de chacun.

La seconde raison est méthodologique. SimEDB est un outil qui sert à comparer visuellement des données de sortie de simulation. Dans les indicateurs présentés, le plus souvent, les intervalles affichés en abscisse sont constants : qu’ils s’agissent du temps, de modalités d’un indicateur (petits seigneurs, grands seigneurs...) ou encore de seuils (composition d’un agrégat en nombre de foyers paysans, discrétisée selon des seuils choisis en amont), l’axe des abscisses est identique quelles que soient les expériences comparées. L’axe des ordonnées, au contraire, est plus variable : qu’il représente une valeur absolue, un décompte ou une fréquence, les ordres de grandeur de ces valeurs sont très hétérogènes selon les expériences comparées. Le choix a donc été fait de présenter visuellement les ordres de grandeur comparables, et donc de superposer les sélections différentes (l’axe des abscisses est alors commun) plutôt que de les afficher côte-à-côte (ce qui aurait complexifié la comparaison des ordonnées en les présentant comme directement comparables alors que les ordres de gran-

deur varient).

Avec un axe « fixe », il est donc opportun de mener la comparaison visuelle sur cet axe, et donc d’aligner les graphiques sur celui-ci. L’organisation des différents indicateurs est donc verticale plutôt qu’horizontale. Afin que la sélection des simulations à explorer soit intuitive, les contrôleurs doivent être alignés aux indicateurs, et dès lors, verticalisés eux aussi. Pour bien différencier visuellement ce qui relève d’un affichage et ce qui requiert une interaction, les contrôleurs s’inscrivent dans un panneau dédié, grisé (figure 5.23), ce qui constitue presque un standard dans les interfaces modernes d’applications interactives.

Onglets et sous-onglets. Comme dans SimVADB (figure 5.22a), on a choisi de conserver une navigation entre indicateurs par un système d’onglets imbriqués : un premier niveau d’onglets permet d’accéder au type d’agents concernés par les indicateurs, et un second niveau permet de sélectionner spécifiquement l’indicateur choisi⁶¹.

En terme de disposition, cela force l’utilisateur à interagir avec l’application régulièrement puisque chaque indicateur doit être sur un onglet dédié. La majorité des utilisateurs potentiels de SimEDB consultent toutefois l’application sur des ordinateurs portables, dotés d’écran réduits et d’une résolution faible. L’encombrement visuel est alors atteint rapidement, et mieux vaut présenter un indicateur à la fois plutôt que de présenter l’ensemble des indicateurs sur une unique page : la démarche d’étude visuelle sera plus longue, mais ne sera pas gênée ou faussée par des graphiques de dimension trop réduites qui peuvent induire des erreurs de lecture.

L’organisation des onglets en eux-mêmes pose aussi une question importante : vaut-il mieux organiser la consultation par type d’agent, ou plutôt, hiérarchiquement, selon la catégorie de processus examinée (**à corriger une fois fixé sur le terme, faire ref au chap3**), par exemple en respectant l’ordre de consultation des indicateurs déterminé ?

Les deux approches présentent des avantages, mais nous avons choisi de rendre l’utilisation de SimEDB plus intuitive à tous, c’est-à-dire en organisant les indicateurs par type d’agents, plutôt qu’efficace, pour les utilisateurs habitués qui auraient bénéficié d’une organisation structurée hiérarchiquement.

5.4.2.3 Choix des modes d’interactions

Avant même la conception de SimEDB, avec la plate-forme SimVADB, nous avions décidé de baser la sélection des simulations sur des graphiques en coordonnées parallèles interactifs (section 5.2.5 : « Interagir avec les rapports : exploration interactive »). La logique d’ensemble du filtrage de simulations restant la même, il n’était pas nécessaire de modifier ce choix pour SimEDB.

61. Notons que cette question revêt une importance réelle en matière d’ergonomie de l’application, mais que l’aspect technique en est pourtant assez simple. Pour changer le mode d’organisation des onglets et sous-onglets, il suffirait de ré-organiser les appels aux composants dans le code-source de l’application.

L'accumulation d'expériences, reposant sur les variations de paramètres différents, ainsi que la démultiplication des paramètres du modèle SimFeodal ayant accompagné son paramétrage, ont pourtant demandé de reconsidérer l'usage de ces graphiques interactifs. Là où seuls quelques paramètres étaient mobilisés auparavant, les graphiques en coordonnées parallèles reposaient sur peu d'axes. Avec l'augmentation du nombre d'axes, le graphique en coordonnées parallèle est rapidement devenu illisible en raison de la surcharge graphique due au recouvrement des axes.

Réduire la surcharge visuelle des graphiques en coordonnées parallèles. La première mesure pour y remédier a été de filtrer les paramètres affichés : nul besoin d'afficher un axe correspondant à un paramètre qui n'est jamais manipulé dans les expériences. Plutôt que de définir les paramètres « utiles », et donc d'avoir à les redéfinir dans l'application à chaque ajout d'expérience qui reposera sur la variation d'un paramètre différent, nous avons fait en sorte que cette discrimination des paramètres « actifs » soit exécutée de manière automatique : quand SimEDB est lancé, une requête est exécutée sur la table des paramètres pour identifier ceux qui présentent plusieurs modalités et ceux qui n'en ont qu'une. Seuls sont alors affichés les paramètres de la première catégorie, car eux-seuls présent un intérêt à être discriminés.

Ce faisant, le nombre de paramètre affichés est réduit, et permet d'afficher leurs intitulés plutôt que de faire appel à une table de correspondance comme dans SimVADB (figure 5.22a, partie (B)). L'automatisation de ce traitement permet de plus de ne pas avoir à changer quoi que ce soit à la plate-forme lors d'ajouts ou de suppressions de simulations de la base de données, ce qui concoure à l'objectif d'indépendance aux données de la plate-forme d'exploration.

Pré-filtrer les simulations. Au fur et à mesure du paramétrage puis de la calibration de SimFeodal, les expériences ont tout de même continué à mobiliser de plus en plus de paramètres différents. Pour réduire la quantité d'information représentée et améliorer en conséquence « l'expérience utilisateur », nous avons ajouté un filtre, moins visuel que les graphiques en coordonnées parallèle, qui permet toutefois de restreindre le nombre de simulations affichées à partir de leur dénomination. Plutôt que de cibler des valeurs spécifiques de paramètres, l'idée est donc de soustraire des choix possibles des expériences entières. Pour SimEDB, on a donc ajouté un pré-filtrage, sous forme de « boîte de sélection » (*select input*, figure 5.24), qui interroge la base de données directement pour connaître les différents intitulés de simulations et agit comme un premier filtre réduisant donc les simulations interrogées dans les graphiques en coordonnées parallèles.

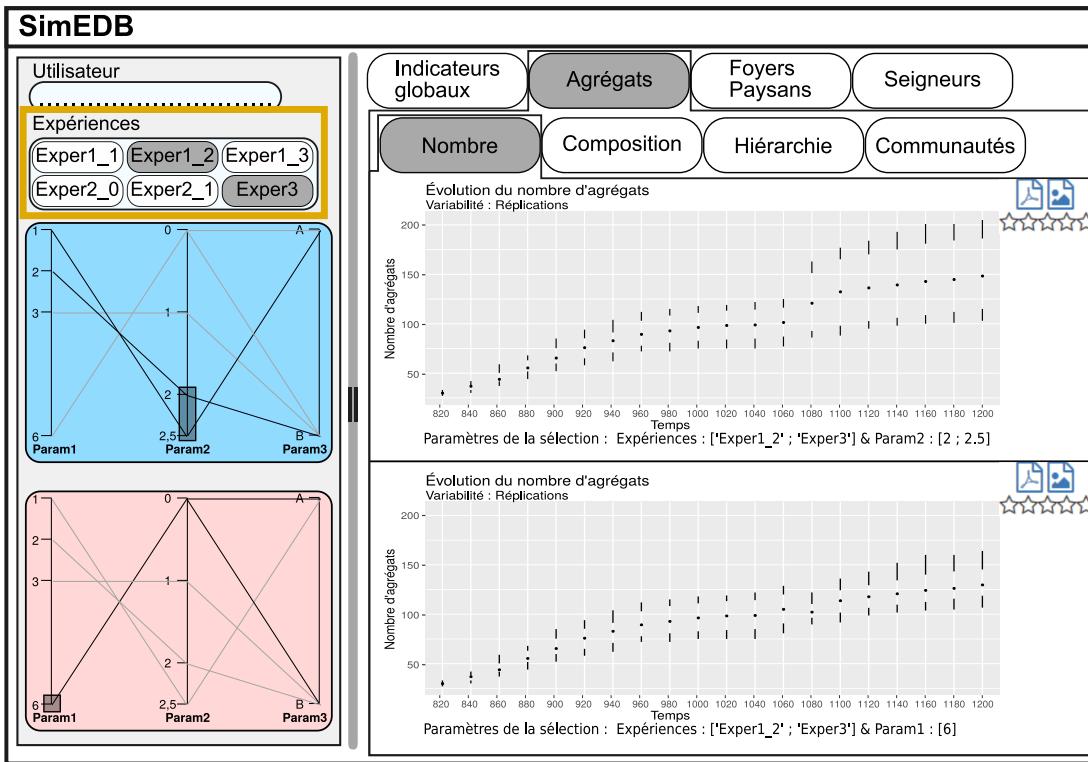


FIGURE 5.24 – Le menu de sélection des expériences (encadré en orange) qui permet un pré-filtrage des expériences à partir de leur nom.

Optimiser l’occupation de l’espace visuel. En dépit de ces différentes techniques visant à minimiser le nombre d’axes affichées dans les graphiques en coordonnées parallèles, la place prise par ces graphiques reste importante, en particulier quand on décide de ne pas diminuer la taille des éléments de légende afin de conserver leur lisibilité. Quand l’application est consultée sur un écran de taille faible, l’appréhension de l’ensemble des informations présentes dans l’interface pose ainsi un véritable problème.

En réfléchissant aux séquences d’usages, par les utilisateurs, de SimEDB, on a pu comprendre que le mode d’utilisation le plus classique était de bien considérer le filtrage à effectuer sur les graphiques en coordonnées parallèles, en y consacrant un temps certain, avant de comparer longuement les différents indicateurs de la sélection. Il n’est donc que rarement fait usage de multiples filtres successifs sur un seul indicateur, dans une approche plus exploratoire donc, mais plutôt d’évaluations complètes de simulations choisies.

Il n’est alors plus indispensable de consacrer une part importante de l’espace aux zones interactives (le panneau de contrôle), ou du moins, pas pendant l’ensemble de la période d’évaluation des simulations.

Un outil de redimensionnement a alors été ajouté à SimEDB, permettant, par glisser-déposer, de modifier la largeur occupée par le panneau de contrôle en l’adaptant à chaque moment au besoin de visualisation. La figure 5.25 montre ainsi une succession d’états : en début d’exploration, l’utilisateur va augmenter la taille du panneau de contrôle pour augmenter la lisibilité des graphiques en coordonnées parallèles et effectuer une sélection plus simplement. Une fois la sélection effectuée, il pourra alors re-diminuer la largeur du panneau afin d’augmenter la zone disponible pour les indicateurs de sorties de simulation, et donc la taille de ces derniers.

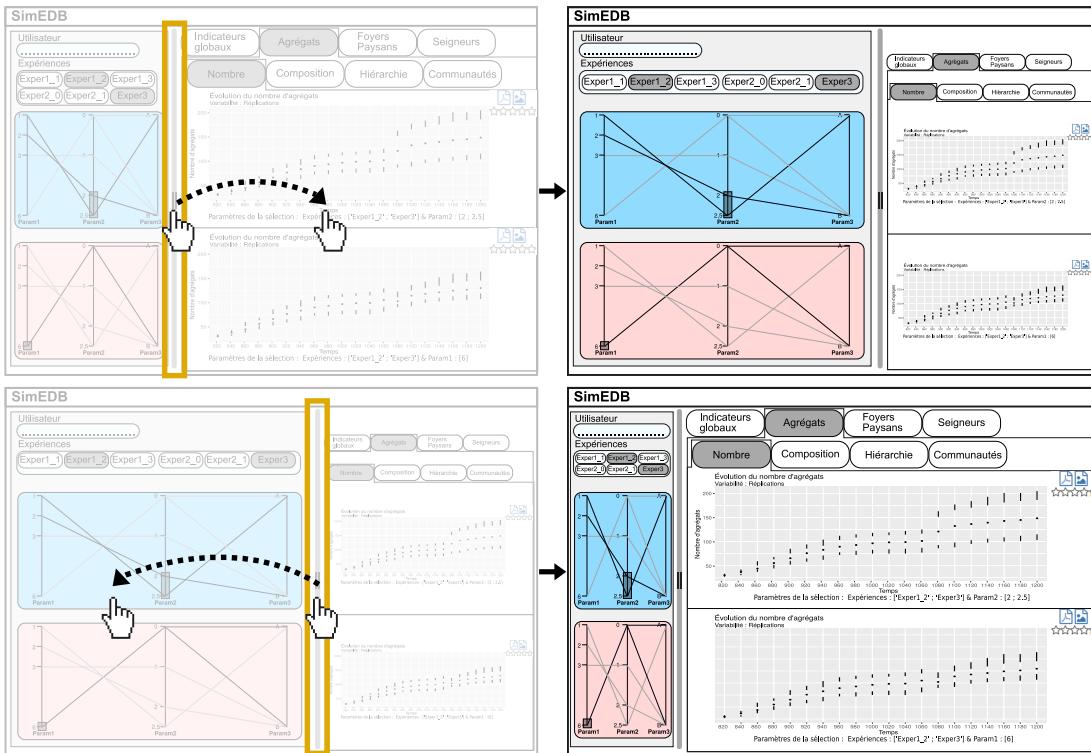


FIGURE 5.25 – Utilisation interactive de SimEDB et redimensionnement du panneau de contrôle.

Répondre aux demandes des utilisateurs : ajout d'un mécanisme d'export des indicateurs. L'intérêt d'une interface modulaire et factorisée se révèle véritablement quand les utilisateurs d'un outil demandent des fonctionnalités supplémentaires, non prévues lors de la conception de l'outil. Dans le cas de SimFeodal, une telle requête est rapidement apparue : les thématiciens, mais aussi les modélisateurs, pour conserver une trace d'une session d'exploration des indicateurs, souhaitaient pouvoir exporter les graphiques correspondant aux indicateurs.

Si au départ, une simple capture d'écran pouvait suffire, ce besoin a été complété par une volonté d'inclure des indicateurs de simulations dans des articles et autres communications, requérant donc des retouches des graphiques. Pour ce faire, on a choisi d'ajouter des fonctionnalités de téléchargement des graphiques, selon deux formats – image et vectoriel – afin de satisfaire à ces deux usages. Avec le développement modulaire adopté, il a suffit d'ajouter ces fonctions d'export en un unique lieu dans le code-source de SimEDB, et l'ajout de ces nouvelles fonctionnalités a alors été disponible automatiquement pour chacun des indicateurs graphiques.

Un autre élément répond à une demande forte des utilisateurs : dans une ré-utilisation hors application des indicateurs, il était difficile de se souvenir des sélections effectuées pour produire un indicateur : en terme de reproductibilité, une fois un graphique exporté sur un ordinateur, il n'y avait plus aucun moyen de connaître les conditions précises de sa création. Nous avons donc ajouté, sur les graphiques eux-mêmes, un résumé des expériences et valeurs de paramètres sélectionnées dans chacun des indicateurs. Cela permet d'en conserver une trace plus durable et augmente leur potentiel réutilisation.

Noter les simulations. Un dernier point d'interaction avec l'application a été prévu, sans pouvoir toutefois être mobilisé jusque là : il s'agissait d'aller vers une semi-automatisation de l'évaluation des simulations, par l'intermédiaire d'un outil graphique permettant de « noter » les simulations sélectionnées. Pour ce faire, et parce que, on l'a vu, l'évaluation d'un ensemble de simulations ne peut se faire de manière unique, on a choisi de donner la possibilité aux utilisateurs experts de noter chacun des indicateurs de sortie, pour chacun des ensembles de simulations qu'ils explorereraient. L'évaluation se fait au moyen d'un outil simple, composé de 5 « étoiles », et est enregistré à chaque nouvelle note.

Une piste d'utilisation serait de mobiliser les données ainsi créées, composées d'une note donnée à un indicateur pour un ensemble d'identifiants uniques de simulations, afin de réaliser des analyses quantitatives des notes attribuées : est-ce que certaines simulations sont systématiquement bien notées avec chacun des indicateurs affichés ? Certains indicateurs ne sont-ils jamais observés ou ne donnent-ils jamais lieu à évaluation ?

Cette fonctionnalité, bien qu'implémentée, n'est pas encore utilisée, mais devrait à terme permettre d'aller vers une meilleure connaissance des résultats de simulation, tout autant que vers une mesure de l'efficacité des indicateurs de sortie choisis pour évaluer un ensemble de simulations.

5.4.2.4 Présentation générale

SimEDB est une application interactive. Il nous semblait dommage d'en présenter l'utilisation d'ensemble par une succession de captures d'écran commentées. Nous avons donc réalisé une vidéo qui en montre l'usage et est disponible à cette adresse : [A faire...](#)

Conclusion

A reprendre après redécoupage du chapitre !

Au terme de la construction de la plate-forme d'exploration, nous disposons donc d'une application, SimEDB, conçue et développée spécifiquement pour les problématiques propres à l'exploration des données de SimFeodal.

Elle s'inscrit dans les méthodes des Interactions Homme-Machine, ou même dans ce que certains nomment désormais les « Interactions Homme-Données » (« *Human-Data Interaction* », ELMQVIST 2011 ; MORTIER et al. 2014) et s'efforce de suivre les préceptes identifiés dans ce champs (AMIRPOUR AMRAII 2018, p. 167-170 par exemple).

Le développement a été fortement guidé par les contraintes et besoins identifiées, aussi bien en terme d'approches méthodologiques que de choix technologiques. SimEDB est donc un outil *ad-hoc*, toutefois pensé de manière modulaire. Tous les composants logiciels de SimEDB sont indépendants et communiquent de manière standardisée, ouvrant la voie à leur remplacement ou « interchangeabilité » : l'architecture logicielle et les choix technologiques le permettent. La plate-forme SimEDB est donc intrinsèquement pensée comme une réponse à des besoins spécifiques, mais cette réponse a été conçue comme générique et en mesure d'être adaptée aisément à d'autres types de données et/ou sorties de modèles de simulation.

Plus généralement, l'ensemble de ce chapitre montre une démarche similaire, pensée pour répondre à des besoins spécifiques avec des solutions génériques et généralisables. Le passage, depuis une succession de rapports jusqu'à une application d'exploration de ces rapports, ou encore les différents éléments relatifs au choix d'un système de gestion de base de données ou au dessin d'un modèle conceptuel de données s'inscrivent en effet dans cette même démarche qui s'ancre profondément dans une logique de recherche reproductible, aussi bien d'un point de vue technique que de celui du concept et de la méthodologie.

6

Exploration du comportement de SimFeodal

Version 2019-10-07

- 25/08/2019 : Rendu à Lena de tout sauf 6.3 (à faire après l'ECTQG).
- 30/09/2019 : début reprises
- 03/10/2019 : fin reprise 6.1
- 06/10/2019 : fin reprise 6.2
- 07/10/2019 : Finalisation et envoi aux Paul² pour retour le 21/10/2019 :
merci !

Sommaire

Introduction	167
5.1 Capter les sorties de SimFeodal	168
5.1.1 Masse des données	168
5.1.2 Tenir compte de la stochasticité du modèle - les répli- cations	172
5.1.3 Des réplications aux expériences	174
5.1.4 Des données aux indicateurs	175
5.2 Comment explorer les sorties de SimFeodal ?	177
5.2.1 Observer les simulations en direct ou <i>a posteriori</i>	177
5.2.2 Générer les indicateurs	181
5.2.3 Organiser les indicateurs en rapports paramétrables	183
5.2.4 Organiser les rapports : les <i>dashboards</i>	188
5.2.5 Interagir avec les rapports : exploration interactive	192
5.2.6 Explorer en comparant : la plateforme SimEDB	197
5.3 Organiser les données	200
5.3.1 Assurer la capacité d'interrogation des données	200
5.3.2 Structuration des données de SimFeodal	214
5.4 Une plate-forme d'exploration de données de simulations :	
SimEDB	222
5.4.1 Contraintes	222
5.4.2 Construire une plate-forme interactive pour l'explora- tion de sorties de simulation	232
Conclusion	248

Chapitre 6

Introduction

Dans les chapitres précédents ont été présentés le modèle SimFeodal ([chapitre 2](#)), la manière de l'évaluer ([chapitre 3](#)), la méthode suivie pour son paramétrage ([chapitre 4](#)) et les outils développés pour mener à bien ces étapes de construction et d'évaluation ([chapitre 5](#)). Avec cet outillage, théorique, méthodologique et technique, nous sommes désormais en mesure d'explorer le modèle SimFeodal. Par « explorer le modèle », on entend ici l'exploration des sorties produites par le modèle, sous toutes leurs formes, afin de gagner en connaissance sur ce qui est modélisé, mais aussi sur la manière dont le modèle est construit et implémenté. Il s'agit autant d'analyser les « résultats » de SimFeodal que d'en explorer le fonctionnement et la robustesse. Ce chapitre est construit en deux parties assez indépendantes mais qui se concentrent sur différents aspects de l'évaluation d'un modèle.

La première partie concerne l'analyse des « résultats » de SimFeodal, c'est-à-dire les réponses produites par le modèle aux questionnements énumérés dans le [chapitre 3](#) : le modèle permet-il bien de générer une polarisation des foyers paysans ? Dans quelles conditions ? Le système de peuplement généré par le modèle est-il hiérarchisé tel qu'on l'attendait, et sa distribution est-elle proche des connaissances empiriques ? Observe-t-on une fixation du peuplement, dans un espace plus disséminé que dans les configurations initiales ? Pour répondre à ces questions, on présente d'abord les étapes de calibrage qui ont permis d'aboutir à une version « définitive » du modèle. On pourra alors introduire les résultats de cette version, en en présentant les conclusions les plus saillantes, c'est-à-dire sans s'attacher à une présentation exhaustive de l'ensemble des indicateurs de sortie issus de cette version.

La deuxième partie de ce chapitre s'attachera à une exploration du comportement du modèle, c'est-à-dire à sa sensibilité. Cette sensibilité peut être entendue au sens de robustesse du modèle face aux différentes valeurs de paramètres (analyse de sensibilité classique). Comment les différents paramètres – et leurs valeurs associées – jouent-ils sur la variabilité des indicateurs de sortie ? Un premier questionnement concerne Les valeurs de paramètres testées ont-elles un effet sur les valeurs des indicateurs de sortie ? Une seconde question concerne la robustesse du modèle à l'aléa. Observe-t-on des différences de variabilité réplicative du modèle selon les différents paramètres et valeurs de paramètres testés ? Dans le cas de SimFeodal, une analyse de ce type pose des questions méthodologiques complexes, en raison notamment du grand nombre de paramètres impliqués et de « l'explosion combinatoire » qui en découle.

6.1 Calibrage du modèle et premiers résultats

Dans le chapitre 3 (section 3.1), on indiquait que SimFeodal s'inscrivait dans la lignée des modèles dont le but est d'« assister la construction de théories », ou encore « à utilité de développement », c'est-à-dire permettant à des chercheurs d'expliquer et de vérifier la cohérence de leurs hypothèses plutôt qu'à les infirmer ou confirmer.

En tant que tels, les « résultats » de SimFeodal ne nous semblent pas revêtir d'enjeu confirmatoire majeur : ils sont là pour participer à l'évaluation du modèle, tant sur un plan interne qu'externe (cf. chap3), mais ne constituent pas pour autant des éléments objectifs et quantifiables de validation.

Dans cette partie, nous rappelons les objectifs du modèle, nous décrivons les étapes de calibrage qui ont été nécessaires afin d'en approcher, et nous présentons enfin les résultats de la version actuelle (6.6¹) du modèle, c'est-à-dire les indicateurs de sortie de simulation issus de cette version, commentés selon la perspective de leur correspondance aux objectifs.

6.1.1 Calibrage du modèle

La phase de calibrage diffère des nombreuses étapes de paramétrage décrites dans le chapitre 4. Il ne s'agit ainsi plus d'ajuster les mécanismes et paramètres pour obtenir une cohérence d'ensemble dans la manière dont le modèle réagit, mais de se concentrer sur quelques paramètres, contextuels, dont on va régler finement les valeurs afin que le contexte de déroulement des autres mécanismes du modèle soit aussi contrôlé et fidèle aux connaissances expertes que possible.

Ces paramètres contextuels sont étroitement liés à certains indicateurs de sortie. Conceptuellement, paramètres et indicateurs sont très largement différents, situés de part et d'autre de la simulation dans une typologie comme celle de Balci (ref chap 4). Pourtant, dans le cas de ces éléments de contexte, les paramètres sont étroitement liés, de manière presque déterministe, aux indicateurs de sortie qui en découleront. Pour « ajuster » la valeur d'un indicateur de sortie, on pourra donc tester différents ensembles de valeurs pour le ou les paramètres qui agissent directement sur ces indicateurs. De plus, pour le calibrage des paramètres, on ne s'attachera pas à l'observation de l'ensemble des sorties possibles, mais seulement des indicateurs directement liés aux paramètres. Par exemple, les paramètres agissant sur le nombre de châteaux en fin de simulation ont un effet global sur le modèle, mais, pour l'aspect contextuel qui nous intéresse dans leur calibrage, seuls les indicateurs relatifs au nombre et au type de châteaux seront mobilisés.

Le calibrage d'un paramètre peut résulter d'un ajustement obtenu de manière expérimentale. Dans ce cas, on cherche les valeurs de paramètres qui assureront un écart minimal entre l'indicateur de sortie de simulation simulé et sa correspondance empirique. Le calibrage peut aussi être thématique, par

1. Faire référence à tableau avec historique des versions du modèle, sans doute chap 3-4.

exemple en menant une recherche plus approfondie sur les valeurs que peuvent prendre, thématiquement, certains paramètres du modèle au regard des connaissances expertes sur lesquels ils s'appuient. Ce second type de calibrage pourrait sembler évident, préalable à une démarche rigoureuse et scientifique, et indispensable à réaliser sur chacun des paramètres d'un modèle qui peuvent être estimés ou ajustés de manière empirique et thématique. Dans un modèle descriptif, exploratoire et surtout basé sur des dynamiques passées, pourtant, la tâche de recherche précise de valeurs pour des dizaines de paramètres semble irréalisable en dehors de projets de modélisation de très large ampleur, ce qui n'est pas le cas de SimFeodal.

Dans les paragraphes suivants, nous donnons des exemples de paramètres qui ont été calibrées dans les dernières phases de paramétrage du modèle. Ces exemples reprennent la distinction établie ci-dessus entre les types de calibrages.

- Le calibrage des paramètres d'*inputs*, c'est-à-dire des paramètres agissant sur l'initialisation du monde simulé, est entièrement thématique ;
- le calibrage des paramètres liés à l'émergence des paroisses, rurales et urbaines, est mixte : il fait appel à des éléments de calibrage thématiques et expérimentaux ;
- Le calibrage des paramètres liés à la création de châteaux par les seigneurs est pour sa part purement expérimental : les paramètres calibrés ne reposent pas sur des données empiriques, au contraire des objectifs quantitatifs en fin de simulation poursuivis.

6.1.1.1 Calibrage des *inputs*

Taille du monde simulé. Depuis sa conception (en 2014) jusqu'à la version 5.1 (Novembre 2018) du modèle, on avait choisi de simuler les agents du modèle dans un monde théorique, de forme carrée, de 100 km de côté. Ces dimensions donnaient au monde du modèle l'étendue des grands départements français contemporains (ou des petites régions), et constituaient ainsi l'échelle à laquelle on souhaitait modéliser les phénomènes décrits dans SimFeodal. Les différentes quantités empiriques relatives à cette dimension y étaient nécessairement fortement liées : population, quantité d'églises, de petites villes etc. On s'appuyait sur une vision assez large et englobante de la Touraine historique, en y incluant par exemple quelques éléments du duché d'Anjou voisin. La Touraine est en effet un espace qui a défini plusieurs ensembles régionaux au cours du temps, du diocèse de Tours dès le III^e siècle au département d'Indre-et-Loire de la Révolution Française, en passant par la province historique de Touraine, successivement comtat (VI^e) et duché (XIV^e). Lors de chacune de ces étapes – et au cours d'entre elles – les frontières ont assez largement fluctué, notamment vis-à-vis de la province d'Anjou.

En avançant dans le calibrage de SimFeodal, on a choisi de préciser l'aire d'étude, en la calant sur une étendue plus restreinte correspondant au diocèse médiéval de Tours, plus stable en matière de délimitation². Cette redéfini-

2. Il n'est ainsi pas mentionné de changement relatif au diocèse de Tours dans MIROT

tion de l'espace d'étude permettait en effet de pouvoir déterminer plus strictement quels éléments empiriques y inclure(châteaux, églises paroissiales...) afin d'avoir des chiffres empiriques mieux spécifiés.

En faisant ce choix, il a fallu en premier lieu revoir à la baisse la taille du monde simulé. Celui-ci, pour rappel, est une surface de forme carrée dont les côtés faisaient initialement 100 km de longueur. Le diocèse de Tours a une superficie proche de de 6 200 km², qui est ainsi inférieure de plus d'un tiers à la superficie originellement choisie (100×100 km, soit 10 000 km²). On a choisi, pour conserver un aspect théorique, de conserver la forme carrée tout en réduisant la superficie : la taille des côtés du monde simulé a été réduite à 80 km, dont seuls 79 sont utilisables dans le cadre du modèle (voir le monde restreint, [chapitre 2](#)), soit une surface de 6 240 km², équivalente à celle de la Touraine³.

Dans SimFeodal, la plupart des mécanismes ont une importante composante spatiale. Dès lors, avec la diminution de la superficie du monde, il a été nécessaire de modifier certains paramètres de contexte et une large partie des paramètres techniques . Par exemple, un paramètre technique (coef_redevance) permet d'ajuster le seuil de satisfaction matérielle des foyers paysans en fonction du nombre de redevances dont ils doivent s'acquitter. En diminuant la taille du monde du modèle, et sans diminuer proportionnellement le nombre ou les surfaces des zones de prélèvement, le nombre de redevances des foyers paysans augmente mécaniquement.

Population. Le nombre de foyers paysans aurait aussi pu être affecté par la taille du monde du modèle, mais on le considère comme un *input* guidé par les connaissances empiriques plus que comme un élément contextuel. C'est un *input* un peu particulier en ce qu'il est extrêmement difficile, sinon vain, de parvenir à une estimation de la population d'une région française durant la période étudiée. On peut tout de même obtenir des indices sur des ordres de grandeur de population à des moments clés de l'histoire. Sur la Touraine, l'expertise des archéologues et historiens (ref à EZR + Monique Bourrin) permet par exemple d'avoir une idée de la population au début du XVII^e siècle, mais les différentes sources préalables présentent des écarts majeurs.

Pour SimFeodal, on a repris une hypothèse d'historien, qui semble réunir un certain consensus dans la communauté. Cette hypothèse consiste à penser qu'un optimum démographique a été atteint au début du XIII^e siècle, et que la population a ensuite diminué considérablement. Les historiens estiment que les niveaux de populations du XIII^e siècle n'ont été rattrapées qu'au début du XVII^e. Il est de ce fait possible d'estimer que les niveaux de populations à l'issue de la période étudiée sont proches de celles, mieux connues empiriquement, du XVII^e siècle. On a choisi de fixer un objectif de population, en fin de simulation (en 1200), à 40 000 foyers paysans, soit une densité d'environ 6.5 feu / km²,

(1950, p. 309–326) jusqu'en 1790, où Tours perd son statut d'archidiocèse (avant de le retrouver quelques années plus tard, en 1801).

3. Dans la suite de ce chapitre, nous référons au diocèse de Tours lors des mentions de la Touraine.

ou encore de 30 habitants/ km².

La population initiale est bien plus difficile à estimer. Selon les sources⁴, certains présentent le IX^e siècle comme un « nadir » démographique (c'est-à-dire un minimum dans l'ensemble du moyen-âge), dont la population aurait été multipliée par plus de 7 pour atteindre son niveau maximal – relativement à la période médiévale – à la fin du XIII^e. Pour d'autres historiens et archéologues, rien ne permet de penser qu'il y ait eu une croissance démographique significative entre ces périodes (voir avec EZR et SL).

Dans SimFeodal, nous avons choisi l'hypothèse la plus prudente et qui a le moins d'implications : considérer que la population est relativement stable entre le début et la fin de la période simulée. Cette « hypothèse nulle » n'a pas d'implication thématique forte ici, et nous permettra par la suite de tester des scénarios où l'on ajoute de la croissance démographique dans le déroulement du modèle (voir encadré 6.2).

6.1.1.2 Calibrage des paroisses

Le calibrage du nombre et de la distribution spatiale paroisses a posé des questions tant thématiques que méthodologiques. Dans SimFeodal, il existe deux mécanismes distincts de création ou promotion de paroisses (voir section 2.3.4 dans le chapitre 2) : un mécanisme dédié aux églises paroissiales situées dans des agrégats (les paroisses « urbaines ») et un mécanisme pour la promotion de nouvelles paroisses en zone peu dense (les paroisses « rurales »). Ces mécanismes servent à faire émerger, de manière guidée, un maillage paroissial similaire, structurellement, à celui que l'on peut reconstituer à partir des connaissances empiriques. L'apparition et la densification de ce maillage, est une conséquence recherchée, dans le modèle, des migrations individuelles des foyers paysans. De plus, ce maillage influe à son tour sur les futures migrations de ces mêmes foyers paysans : la création de nouvelles paroisses et leur localisation agissent sur les choix de migration des foyers paysans, en constituant l'un des éléments polarisant.

Les paroisses sont ainsi autant des marqueurs spatiaux, témoins de la distribution spatiale des foyers paysans de l'époque, que des catalyseurs à la polarisation et à la fixation de cette même population. Au sein du modèle, la transformation du maillage paroissial joue un rôle contextuel, conditionnant les migrations des foyers paysans, et un rôle émergent, que l'on observe à une échelle plus agrégée (densification ou étalement, rythmes de changements etc.) C'est le rôle contextuel que l'on a calibré, par l'intermédiaire des paramètres de contexte agissant sur la création et la localisation des paroisses, et non des paramètres régissant l'influence des paroisses sur les foyers paysans.

Calibrer le nombre et l'espacement des paroisses « rurales ». Pour le calibrage des paroisses « rurales », on se base surtout sur des aspects thématiques issus de connaissances archéologiques. On connaît ainsi, au moins

4. Voir avec les archéos. Par exemple, dans le nord de la France (Picardie, IdF etc.) : « La population du Nord au Moyen Age. I : avant 1384 » de Alain Derville (1998).

pour la fin du XII^e siècle, le nombre et la répartition spatiale de la plupart des paroisses de Touraine (en s'appuyant sur ZADORA-RIO (2008, p. 31), on considère dans le modèle qu'il y a environ 300 églises paroissiales). Celles-ci correspondent majoritairement à des milieux ruraux et ont en partie perduré dans le maillage communal actuel. La fin du XII^e correspond à la date d'arrêt du modèle, et cette quantité empirique de paroisses constitue ainsi un objectif à atteindre pour SimFeodal en fin de simulation.

La répartition spatiale de ces églises paroissiales, en fin de période, peut être dérivée d'estimations empiriques sur l'espacement moyen entre églises paroissiales : « Entre 900 et 1200, l'augmentation importante du nombre de lieux de cultes attestés par les sources écrites se traduit par une diminution nette de l'espacement observé entre les sites : on passe d'une distance moyenne d'un peu plus de 4 km entre deux églises en 900, à une distance d'environ 2,8 km en 1200. » (CHAREILLE, RODIER et ZADORA-RIO 2008, p. 261). Ces espacements empiriques permettent de calibrer le modèle via le calcul d'un indicateur dédié à la mesure de la moyenne des distances à la plus proche église paroissiale.

Le calibrage porte sur le paramètre associé aux mécanismes de création/-promotion de paroisses rurales. Ces mécanismes sont complexes (voir chap2, section 2.7.2.3) et le paramètre qui les régit, seuil_nb_paroissiens_insatisfaits, a donc une influence importante et difficilement prévisible sans expérimentation. Dans l'ensemble, ce paramètre agit comme un seuil de foyers paysans au-delà duquel une nouvelle église paroissiale est créée ou promue en zone rurale. Pour le calibrage, on a fait varier le paramètre : diminuer la valeur de ce seuil poussait à la création de plus de paroisses rurales, et l'augmenter limitait le nombre final. Dans l'état actuel du modèle, le nombre de paroisses rurales est encore trop important au regard des connaissances empiriques (380 au lieu de 300, voir le tableau 6.1 page 262), mais on n'a pas augmenté le seuil afin qu'il garde du sens sur le plan thématique. Le seuil est fixé à 20 foyers paysans, et thématiquement, on estime que cette quantité pouvait suffire à la création d'une nouvelle paroisse.

Calibrer le nombre et la hiérarchie des paroisses « urbaines ». On dispose de moins de données empiriques pour les paroisses urbaines que pour les paroisses rurales. On sait que le nombre de paroisses d'une ville est à peu près corrélé à sa population (mais aussi à l'ancienneté de la ville par exemple). On estime aussi que dans les plus grosses villes de la région (Tours, Loches...), le nombre de paroisses ne dépasse pas la dizaine. On ne peut pas reconstituer la hiérarchie du nombre de paroisses par villes en fonction des tailles de celles-ci, mais ces éléments empiriques nous fournissent toutefois des cadres pour le calibrage du modèle.

Dans SimFeodal, un paramètre (ponderation_creation_paroisse_agregat) contrôle seul la création de paroisses au sein des agrégats. C'est un « paramètre de mécanisme », quand bien même sa valeur est assez éloignée de l'empirie : elle définit le seuil de foyers paysans (par paroisse urbaine, c'est-à-dire pondéré par le nombre de paroisses présentes dans l'agrégat) à partir duquel la proba-

bilité de créer une nouvelle paroisse dans l'agrégat atteint 1. On a procédé par calibrage expérimental, manuel, en testant différentes valeurs pour ce seuil, tout en restant dans des ordres de grandeur acceptables d'un point de vue empirique. Il n'aurait par exemple pas été souhaitable de placer ce seuil à 10 foyers paysans, ce qui aurait impliqué que des paroisses secondaires soient générées dans chaque petit agrégat, résultant thématiquement en une paroisse par hameau par exemple).

Une difficulté particulière du calibrage a porté sur une des spécificités du mécanisme : il consiste à pondérer le nombre de paroissiens par le nombre de paroisses de l'agrégat. Dès lors, la définition des « paroisses de l'agrégat » revêt une importance considérable et est difficile à stabiliser : un agrégat qui change légèrement d'emprise spatiale entre deux pas de temps peut « exclure » une église paroissiale de son emprise, parfois à quelques dizaines de mètres près seulement. Le calibrage du paramètre de pondération de création de paroisse au sein d'agrégats a donc été mené conjointement à des ajustements sur les mécanismes de définition des agrégats, et donc à un calibrage aussi des paramètres techniques et de mécanismes impliqués dans la définition spatiale des agrégats.

6.1.1.3 Calibrage des châteaux

Le calibrage des châteaux a été plus simple du point de vue de son préalable, c'est-à-dire de la recherche de données empiriques en vue de l'estimation de la situation initiale et finale. La documentation est précise quant au nombre et aux périodes d'apparition de ces monuments dans l'espace d'étude, et leur nature massive leur a le plus souvent assuré une forte pérennité, atout rare dans l'étude de monuments anciens. Dans l'ensemble, on sait que le nombre de châteaux⁵ est très faible, si ce n'est nul, au début de la période. On voit apparaître des châteaux dès le milieu du X^e siècle, sans doute en réaction au climat de violence qui s'établit à ce moment. En 1200, on estime⁶ le nombre de châteaux, en Touraine, à une cinquantaine.

Dans SimFeodal, les châteaux apportent une protection nécessaire aux foyers paysans, mais en contre-partie permettent aussi aux seigneurs de prélever des droits supplémentaires. Leur quantité a donc une importance certaine sur le déroulement des simulations, et l'ajustement des châteaux revêt donc un intérêt majeur en termes d'élément structurant du contexte spatial dans lequel évoluent les foyers paysans.

Nombre de châteaux. Dans les premières versions du modèle, des seuils fixes, dépendant de la puissance des seigneurs, avaient ainsi été définis pour

5. Comme pour la définition des villes, il y a un débat important en archéologie et en histoire sur la définition de ce qu'est un château. Faut-il y inclure, par exemple, les *castra* antiques ? Les mottes castrales ? Dans le cadre de ce modèle, nous avons considéré les « châteaux forts », par nécessité d'établir un référentiel accessible pour la collaboration entre thématiciens et modélisateurs.

6. L'approximation ne porte pas sur le nombre concret de châteaux construits au total dans la région, mais sur leur date de construction : on ne peut alors que mener une estimation du nombre de châteaux déjà existants à cette date.

caractériser la probabilité de chaque seigneur de construire un château. Dès lors que les modifications du modèle ont amené à des changements dans la population des foyers paysans (le passage de 1 000 foyers paysans à 4 000, puis à 40 000 dans les versions les plus récentes, voir chapitre 2 et 4.1.4.4), le nombre de châteaux a été fortement impacté. Les seuils étaient ainsi trop liés à des variables techniques (la puissance des seigneurs, qui dépend du nombre de foyers paysans du modèle), et donc le mécanisme n'était pas robuste aux évolutions du modèle.

Pour que le nombre de châteaux généré soit moins sensible, le mécanisme a été adapté à plusieurs reprises et on y a introduit de nouveaux paramètres techniques permettant un contrôle plus robuste. La figure 6.1 donne un exemple de test de l'un de ces paramètres (`nb_tirages`, qui définit le nombre de tirages aléatoire qu'un grand seigneur peut réaliser pour éprouver sa probabilité de construire un château). Ce paramètre ayant une influence visuellement linéaire sur le nombre de châteaux en fin de simulation, on peut identifier dans ce graphique que pour obtenir 50 châteaux en fin de simulation (graphique de gauche), la valeur la plus adaptée du paramètre `nb_tirages` est de 3.

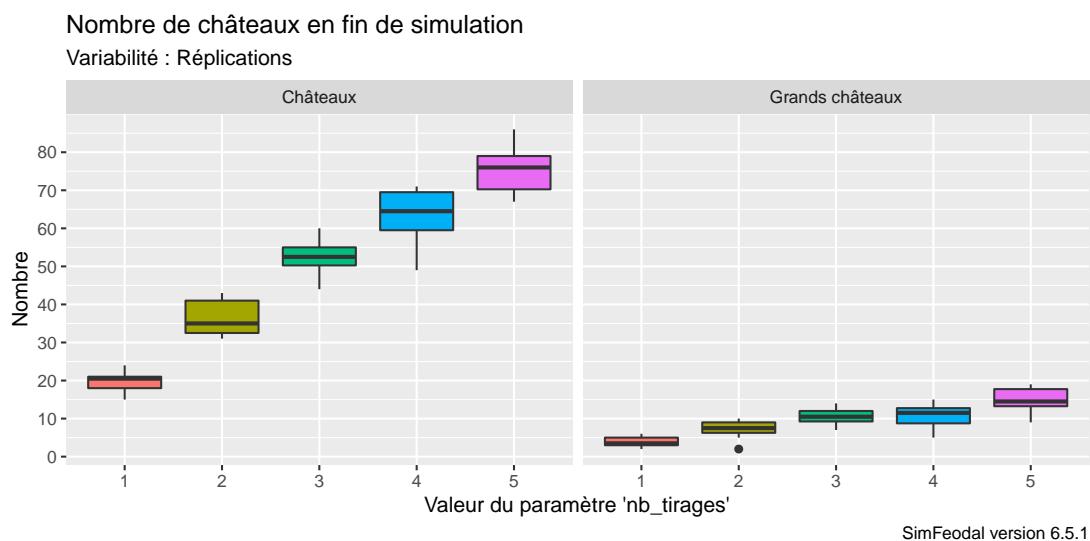


FIGURE 6.1 – Influence du paramètre nb_tirages sur le nombre de châteaux

En jouant sur les différents paramètres associés à la construction d'un château, on obtient un ensemble de valeurs de paramètres qui amènent à la construction d'une quantité régulière de châteaux, dont le nombre en fin de simulation correspond aux données empiriques (figure 6.2).

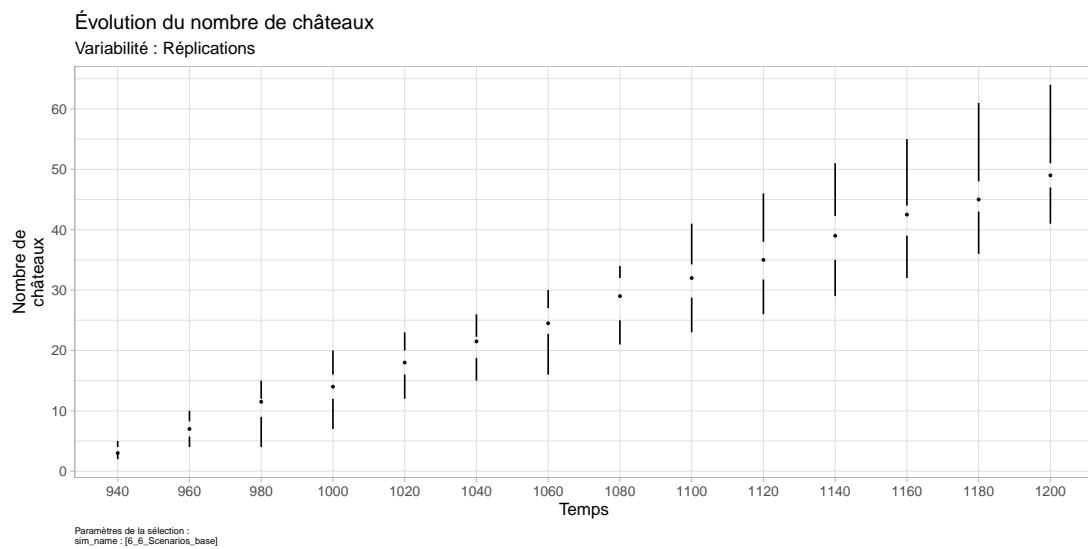


FIGURE 6.2 – Évolution du nombre de châteaux simulé par le modèle calibré.

Détail des types des châteaux. Le nombre de châteaux n'est toutefois pas la seule valeur empirique sur laquelle on essaie d'ajuster le contexte. En effet, dans SimFeodal, on distingue plusieurs catégories de châteaux, d'une part selon leur importance (grosses et petites châteaux), et d'autre part selon le type de seigneurs qui les ont construits (petits ou grands seigneurs). L'importance des châteaux joue sur leur attractivité vis-à-vis des foyers paysans (un gros château contribue davantage à l'attractivité du pôle d'attraction qui le contient qu'un petit château). Le type de propriétaire joue quant à lui sur le prélèvement des droits associés : un château construit par un grand seigneur a des zones de prélèvement associées plus larges que celles d'un petit seigneur.

Ces distinctions dans le modèle, d'un niveau de détail supérieur à celui de nombreux mécanismes, sont possibles car elles s'appuient sur des typologies empiriques connues sur la région d'étude. Leur prise en compte permet d'affiner le contexte spatial dans lequel les foyers paysans évoluent, aussi bien en matière de répulsion (*push*, par le type de constructeur) que d'attraction (*pull*, par les attractivités différencierées).

À la fin de la période, en Touraine, on estime à une dizaine le nombre de « forteresses »⁷. Dans SimFeodal, on a donc pu calibrer les paramètres liés à la promotion de châteaux de manière à obtenir 10 gros châteaux (correspondants aux forteresses empiriques) et 40 (50 - 10) petits châteaux en fin de simulation.

On connaît de plus, empiriquement, les seigneurs à l'initiative de la construction des châteaux. Dans la plupart des cas (de 40 à 45 châteaux sur les 50), ce sont les seigneurs les plus importants : ducs et comtes d'Anjou et de Touraine, représentés dans SimFeodal par les grands seigneurs. Les 5 à 10 châteaux restant sont issus de seigneurs de moindre importance qui ont toutefois acquis une puissance symbolique et militaire bien supérieure à celles des autres petits seigneurs. Dans SimFeodal, on a donc calibré les paramètres régissant les mécanismes de création de châteaux, différenciés pour les grands et petits seigneurs, afin que les valeurs obtenues par simulation soient similaires aux valeurs em-

7. Trouver ref. avec Samuel pour distinguer les « forteresses importantes » et les « points fortifiés secondaires »

piriquement connues.

Les graphiques de la figure 6.3 présentent les résultats obtenus dans la dernière version de SimFeodal. Ils ne sont pas entièrement satisfaisants, mais résultent d'un compromis entre le calibrage des trois indicateurs que sont le nombre et le type des châteaux, ainsi que le statut de leurs constructeurs.

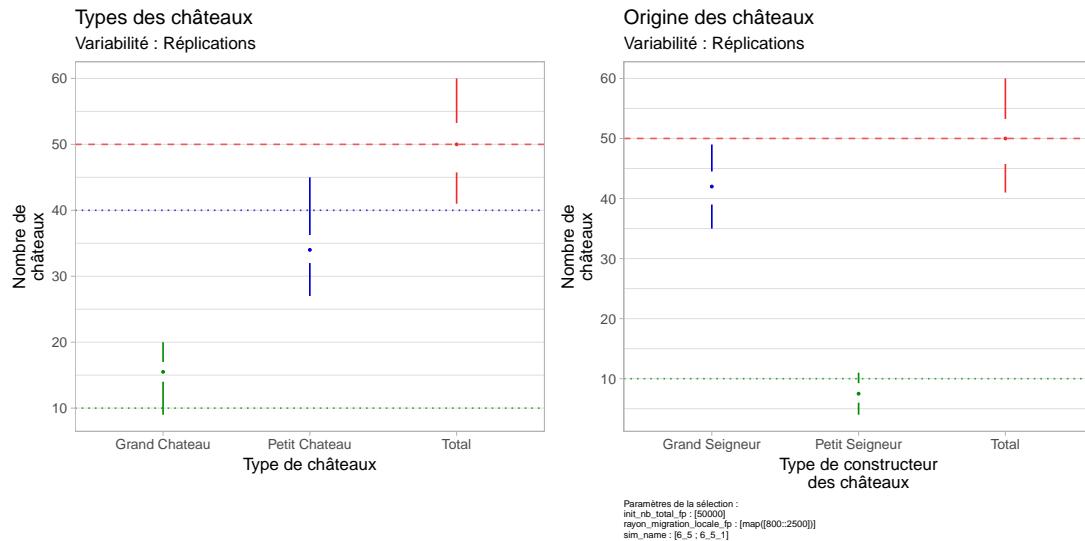


FIGURE 6.3 – Détail de la composition des châteaux en fin de simulation à l'issu du calibrage de SimFeodal.

Les lignes horizontales en pointillés représentent les objectifs à atteindre, définis selon les connaissances empiriques.

6.1.2 Résultats des simulations

Il manque des corrections de Lena, depuis cette intro jusqu'à la figure 6.6 (nombre de pôles et part des agrégats comprenant un pôle). Lui redemander la version numérique de sa correction, que je n'ai pas eu pour ce petit bout.

Nous avons largement décrit, dans le chapitre 3, les objectifs poursuivis par le modèle et les indicateurs de sortie de simulation employés pour les évaluer. Pour rappel, ces objectifs peuvent être catégorisés en trois familles, selon les objectifs thématiques qu'ils cherchent à reproduire :

- Polarisation du système de peuplement : le modèle parvient-il à faire émerger une structure polarisée et concentrée de l'habitat, où les foyers paysans sont concentrés dans des agrégats de population plutôt que dispersés comme dans la situation initiale ?
- Hiérarchisation du système de peuplement : depuis une situation initiale composée d'une faible hiérarchie dans les agrégats (des « agglomérations secondaires antiques » d'une trentaine de foyers et des « villages » d'une dizaine de foyers), parvient-on à une structure hiérarchique, proche du modèle log-normal identifié dans la majorité des systèmes de peuplement historiques et contemporains ?
- Fixation et dissémination du peuplement : on estime que la population, initialement assez mobile (relativement à la granularité temporelle du modèle, soit tous les 20 ans) tend peu à peu à se fixer. Cette fixation, dans des agrégats, s'assortit d'une dispersion à l'échelle de la région modélisée : d'une occupation dispersée et quasi-aléatoire, l'objectif thématique est que les agrégats maillent progressivement l'ensemble du monde simulé. Observe-t-on bien ces deux processus dans le déroulement des simulations ?

Dans cette partie, nous allons synthétiquement commenter les indicateurs de sortie de simulation issus de la version calibrée (6.6) de SimFeodal, en analysant l'écart entre les objectifs attendus, thématiques, et les résultats du modèle.

Par soucis de parcimonie et de synthèse, les résultats présentés par la suite ne sont qu'une sélection de l'ensemble des résultats du modèle. Nous invitons le lecteur à les consulter directement dans l'application SimEDB d'où ces indicateurs sont extraits. Le lien suivant permet d'accéder aux résultats spécifiques à la version présentée ici : [Créer lien direct](#)

6.1.2.1 Résumé global des résultats

Avant de chercher à analyser les résultats du modèle à une échelle fine, le tableau 6.1 peut déjà synthétiser une bonne part des résultats agrégés, en fin de simulation. Il rassemble les indicateurs de sortie de simulation quantitatifs, qui décrivent uniquement l'état du modèle en 1200, à la fin de la simulation.

Indicateur	Valeur attendue ⁸	Moyenne	Médiane	Q1	Q3	Écart-type
Agrégats	200	249	248	244	253	10.45
Gros châteaux	10	15	15	13	17	2.87
Églises paroissiales	300	348	348	338	359	12.96
Distance moyenne entre églises	3 000 m	1 459 m	1 456 m	1 391 m	1 537 m	97 m
Part de foyers paysans isolés	20 %	30 %	30 %	30 %	30 %	0.8 %
Augmentation de la charge fiscale des foyers paysans	x 3	x 2.4	x 2.4	x 2.4	x 2.5	x 0.03

TABLEAU 6.1 – Valeurs des indicateurs numériques en fin de simulation.

On y constate en premier lieu que les ordres de grandeur sont plutôt respectés, à l’exception peut-être de la distance entre églises paroissiales⁹.

Concernant les autres indicateurs, on peut noter qu’ils sont un peu trop importants, ce qui est rendu plus significatif par des variabilités faibles (les médianes et quartiles sont assez proches de la moyenne, et l’écart-type est faible relativement aux grandeurs considérées). Le nombre d’agrégats et d’églises paroissiales simulés dépasse ainsi dans les deux cas d’une cinquantaine les valeurs empiriques correspondantes. La part de foyers paysans isolés en fin de simulation est trop importante de 10%, quand bien même l’intervalle de confiance empirique est assez flou.

Le nombre de gros châteaux dépasse significativement l’objectif, comme on a pu le constater dans la figure 6.3 (gauche), mais on expliquait alors que nous ne parvenions à ajuster davantage cette valeur aux quantités empiriques sans déstabiliser d’autres éléments du modèle.

Le dernier indicateur, l’augmentation de la charge fiscale des foyers paysans, est quant à lui assez satisfaisant : il est certes plus faible que l’objectif empirique fixé (augmentation de 2.4 au lieu de 3 de la charge fiscale moyenne entre le début et la fin de la simulation), mais dans le cas de cet objectif empirique difficile à estimer, cette valeur nous paraît suffisante.

Dans la suite de cette partie, nous menons une analyse plus fine des résultats du modèle, en observant de manière plus précise les valeurs des indicateurs de sortie de simulation qui caractérisent les « trois familles » d’objectifs thématiques : polarisation, hiérarchisation et fixation-dissémination.

8. Objectif en fin de simulation

9. La distance moyenne simulée est ainsi de 1459m, c'est-à-dire deux fois moindre que les estimations empiriques. Notons que cela s'explique notamment par le nombre trop élevé d'églises paroissiales, et par la difficile constitution de cet indicateur : les données empiriques concernent surtout les paroisses rurales, alors que l'on tient ici compte de l'ensemble des églises paroissiales. Les églises paroissiales urbaines, très proches les unes des autres, tirent ainsi considérablement la moyenne des distances à la baisse. Il est difficile, dans le modèle, de différencier les églises paroissiales rurales et urbaines, et on ne peut donc obtenir un indicateur de sortie directement comparable aux données empiriques.

6.1.2.2 Capacité du modèle à simuler la polarisation des foyers paysans

Les résultats mettent en évidence une forte concentration des foyers paysans, dont la part de foyers isolés diminue de manière importante, d'environ 90% à 30% en fin de simulation (figure 6.4).

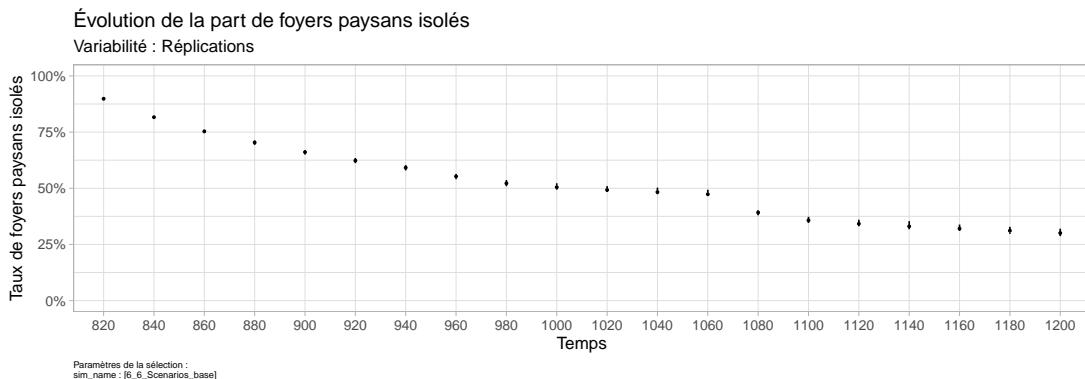


FIGURE 6.4 – Concentration des foyers paysans.

Cette diminution paraît assez régulière, en dépit d'une légère rupture de tendance entre 1060 et 1080, période qui correspond dans le modèle à une évolution du seuil de satisfaction religieuse. Notons que parmi les 20 réplications étudiées, cet indicateur se montre extrêmement stable, les marques visuelles de variabilité étant à peine visibles.

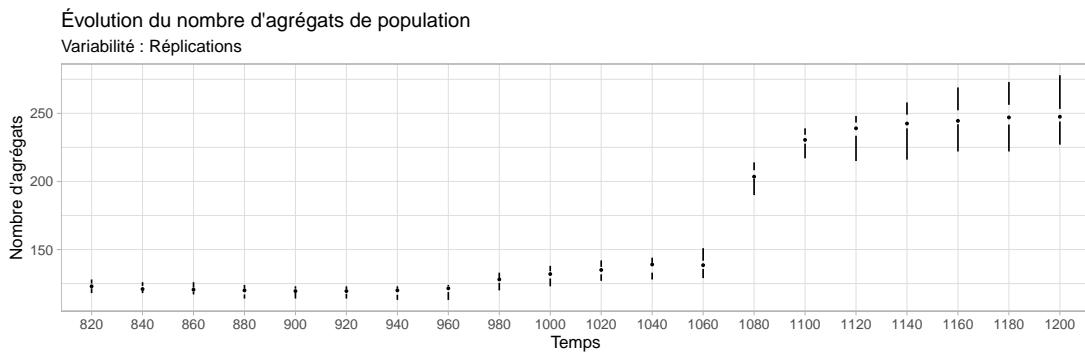


FIGURE 6.5 – Nombre d'agrégats.

La concentration des foyers paysans s'effectue à destination d'un nombre croissant d'agrégats (figure 6.5). Dans l'évolution de ce nombre, on constate un effet de seuil important entre 1060 et 1080 (pour les mêmes raisons que l'augmentation de la concentration), mais aussi, un premier changement de tendance entre 940 et 960 d'ampleur moindre. Ces deux paliers caractérisent les trois régimes repérés empiriquement, c'est-à-dire une augmentation lente, suivie d'une augmentation rapide et enfin une stabilisation du nombre d'agrégats.

À la différence d'une simple concentration du peuplement, la polarisation implique que des éléments (des pôles) jouent un rôle d'attracteur, et que la concentration s'effectue donc à proximité de ces pôles.

Dans SimFeodal, on cherche donc d'une part à ce que les foyers paysans se concentrent et forment des agrégats, et d'autre part à ce que ces agrégats se constituent autour des pôles d'attraction constitués par les agents attracteurs

du modèle (églises paroissiales, châteaux et agrégats dotés de communautés paysannes). Pour savoir si le modèle parvient bien à reproduire le fait stylisé qu'est la polarisation du peuplement, on mobilise donc des indicateurs relatifs à la quantité de pôles et à leur localisation.

Dans cette version du modèle, on constate bien une croissance du nombre de pôles (figure 6.6-a), assez semblable à celle des agrégats en termes de rythme et de valeur. Les valeurs atteintes (environ 250 pôles en fin de simulation) sont très satisfaisantes, particulièrement au regard des résultats de la version 0 du modèle ([ref chap 3 ou annexe](#)).

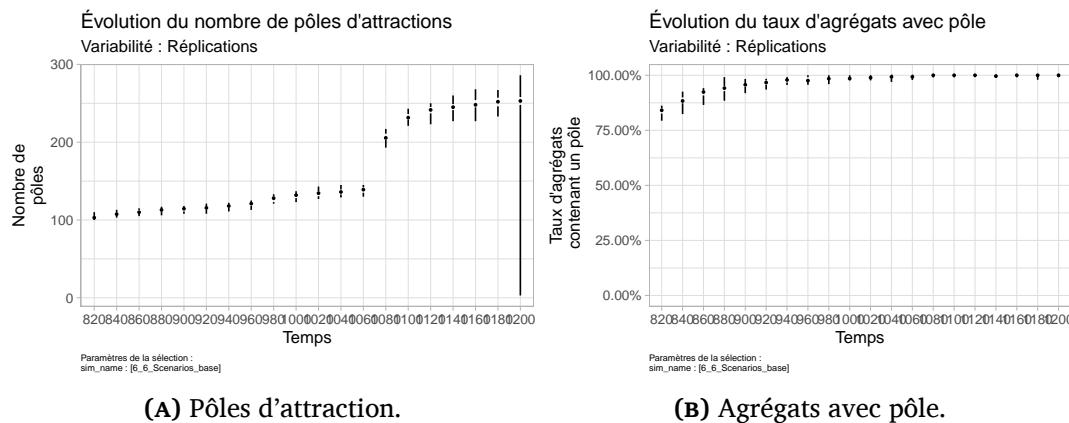


FIGURE 6.6 – Nombre de pôles et part des agrégats comprenant un pôle.

La figure 6.6-b présente elle-aussi des résultats satisfaisants, qui viennent préciser l'analyse précédente. Cette figure présente l'évolution du taux d'agrégats qui sont situés dans un pôle d'attraction. On remarque que ce taux augmente très rapidement pour ensuite se maintenir autour de 100% : cela signifie que tous les agrégats sont situés dans un pôle, et donc que les agrégats se sont bien formés autour de pôles d'attraction plutôt que de manière purement dispersée. Cette figure constitue ainsi un des indices montrant que SimFeodal parvient bien à reproduire le processus de polarisation tel qu'observé empiriquement.

Les cartes de la figure 6.7 permettent de noter que le semis des pôles se confond spatialement avec celui des agrégats, ce qui amène un élément d'interprétation supplémentaire : les agrégats sont bien constitués dans des pôles (paragraphe précédent), mais en plus, tous les pôles semblent contenir un ou des agrégats. Le modèle fait donc émerger une quasi-équivalence entre pôles et agrégats, quasi-équivalence que l'on retrouve chez LE BRAS et LE BRAS-FOLAIN (1976, p. 27-28), en assimilant les pôles à leurs seules églises : « Le village appelle l'église. [...] L'église fait naître le village. ».

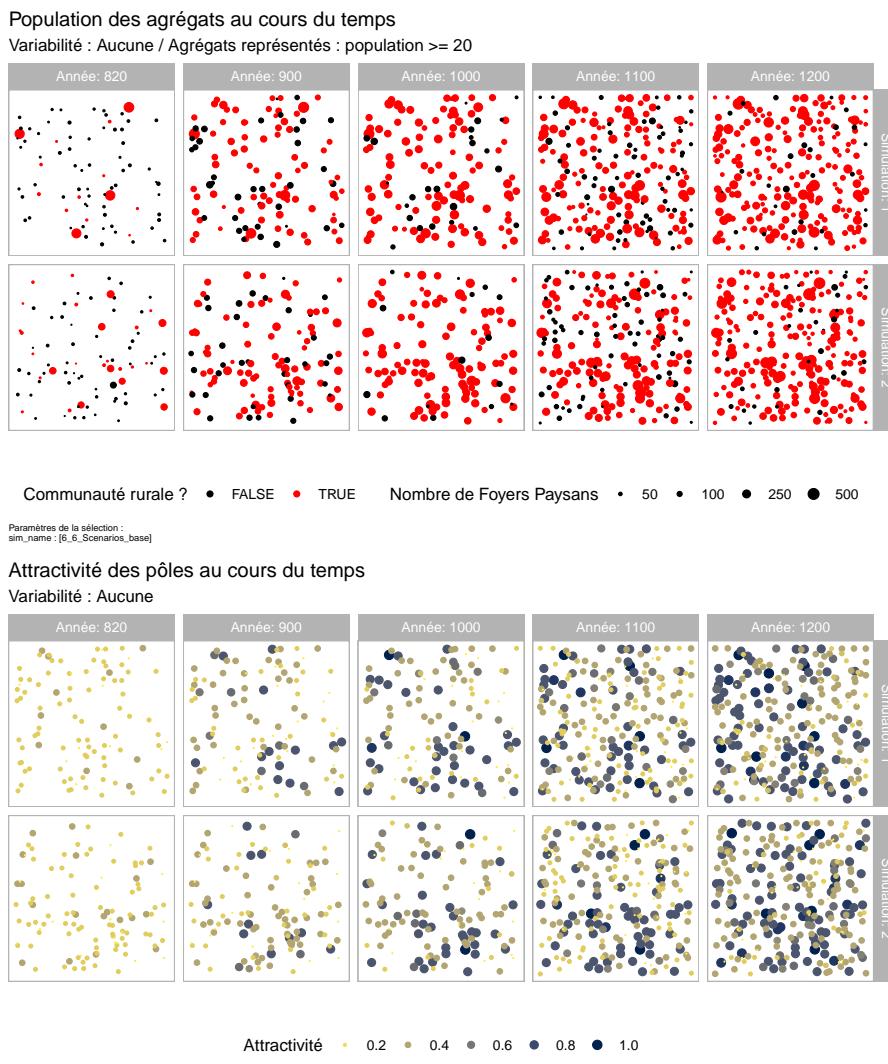


FIGURE 6.7 – Dispersion spatiales des agrégats et pôles.

Sur le plan de la polarisation d'ensemble des foyers paysans au sein d'agrégats de population, les résultats du modèle montrent que SimFeodal est entièrement capable de reproduire les attendus. La valeur finale issue des simulations est certes légèrement inférieure à l'objectif, mais tous les ordres de grandeurs et surtout les rythmes estimés correspondent largement aux estimations issues des connaissances expertes.

6.1.2.3 Capacité du modèle à simuler la hiérarchisation du système de peuplement

Les dernières figures étudiées montraient une forte hétérogénéité dans la taille des agrégats (un agrégat est créé dès 5 foyers paysans, et la légende de la première série de cartes – dispersion des agrégats – s'étend entre 50 et 500 foyers), ce qui constitue déjà un indice sur le niveau de hiérarchisation de ces concentrations locales de foyers paysans.

Comme indiqué dans le chapitre 3, il est difficile d'avoir des mesures précises de la distribution statistique attendue dans le système de peuplement. Les différentes sources historiques divergent aussi bien sur les quantités absolues

que sur la forme des distributions. Ces sources s'accordent en revanche sur une nette hiérarchisation, avec une distribution qui doit tendre vers les formes log-normales dont l'on retrouve l'existence dans les sociétés contemporaines.

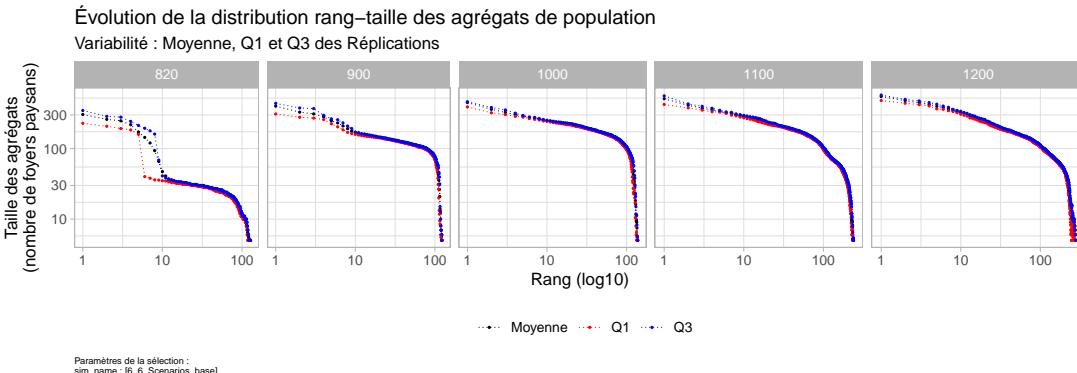


FIGURE 6.8 – Organisation hiérarchique des agrégats.

La figure 6.8 montre une claire hiérarchisation des agrégats : la courbe se « redresse » au cours de la simulation, marque d'une pente croissante. Les valeurs absolues augmentent aussi : les plus gros agrégats voient leur population croître. Le « coude » dans la courbe, qui correspond à la longue traîne de petits agrégats, se réduit.

En parallèle de cette nette hiérarchisation des agrégats, les graphiques de la figure 6.9 permettent de constater une toute aussi nette hiérarchisation des pôles. Cela n'est pas surprenant dans la mesure où on a vu qu'agrégats et pôles se confondaient, ce qui constitue en soi un résultat satisfaisant.

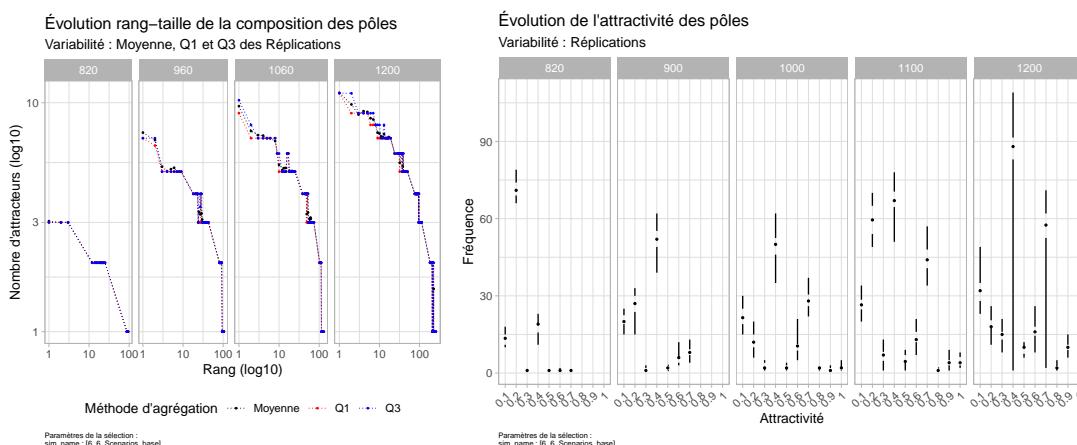


FIGURE 6.9 – Organisation hiérarchique des pôles.

La mesure représentée dans la figure de gauche – le nombre d'attracteurs de chaque pôle – est beaucoup plus « discrète » que le nombre de foyers paysans des agrégats. Il y a moins de modalités (de un à une dizaine d'attracteurs, contre de 5 à plus de 500 foyers paysans), donc moins d'effets possibles de coudes. Ce graphique communique donc plus lisiblement, visuellement, la forte hiérarchisation des pôles. Comme le nombre maximum d'attracteur augmente régulièrement (environ 3 en début de simulation contre plus de 10 à la fin), on peut dire que dans le modèle, cette hiérarchisation est dûe à une croissance des pôles les plus importants et non à une croissance équitablement répartie. Par exemple, en fin de simulation, sur les 250 pôles, moins de la moitié est composée de plus de trois attracteurs.

En cela, le modèle reproduit bien l'apparition d'une tête de hiérarchie urbaine, qui trouve une correspondance empirique dans les villes (Amboise, Loches, Chinon...) de la région d'étude, organisées autour de châteaux et composées de multiples églises paroissiales. La figure 6.9-b montre aussi cette hiérarchisation : elle met en évidence un glissement des modalités d'attraction depuis une valeur de 0.2 (deux églises paroissiales) à un double mode à 0.4 (deux églises et une communauté) et 0.7 (plusieurs églises, un château, une communauté...).

Un dernier élément du modèle en lien avec la hiérarchisation du peuplement est composé par la hiérarchie des paroisses. On peut extraire deux types de comportements attendus à partir des connaissances empiriques.

- En premier lieu, une large majorité des paroisses, que l'on pourrait nommer « rurales », sont peu fréquentées et visent surtout à une desserte équitable de la population. Un paroissien ne devait ainsi pas avoir à effectuer plus d'une heure de marche pour se rendre dans son église paroissiale.
- En second lieu, les paroisses « urbaines » desservent un nombre de paroissiens bien supérieur à celui des paroisses rurales. D'après les connaissances expertes, ce nombre reste largement inférieur au millier de paroissiens, puisque de nouvelles paroisses urbaines étaient créées pour décharger les églises paroissiales trop fréquentées.

En agrégeant ces types de paroisses, le fait stylisé que l'on cherche à reproduire dans le modèle serait donc d'avoir une distribution composée de deux tendances : une tête de hiérarchie desservant un grand nombre de paroissiens, mais avec une faible hiérarchisation interne (paroisses urbaines), et une très longue traîne, cette fois ci plus hiérarchisée et desservant beaucoup moins de paroissiens (paroisses rurales).

Dans la figure 6.10, on constate que le modèle semble reproduire ce type de distribution : on y remarque bien une courbe caractérisée par une double tendance. Le haut de la hiérarchie présente une pente faible, signe d'une homogénéité importante entre 100 et 300 paroissiens, et est nettement séparé d'une longue traîne, graphiquement presque verticale, inférieure à 100 paroissiens. Le nombre maximum de paroissiens diminue au cours de la simulation, passant de plus de 1000 à environ 300.

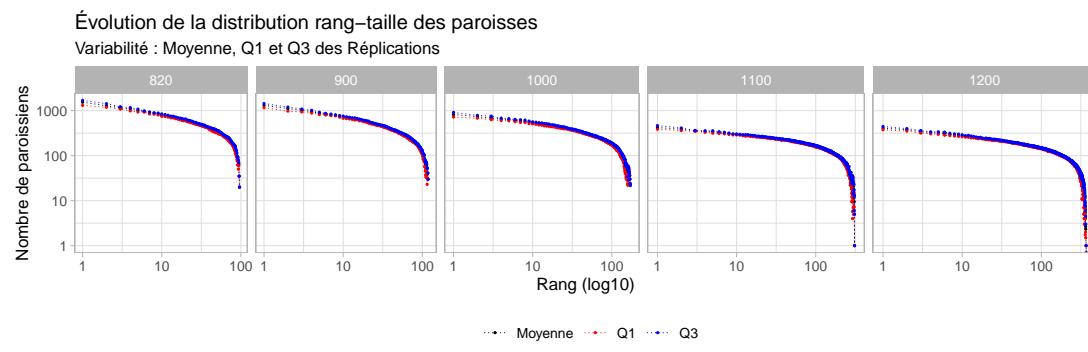


FIGURE 6.10 – Organisation hiérarchique des paroisses.

En regardant des indicateurs plus détaillés (figure 6.11), on peut remarquer que cela correspond en fait à une forte homogénéisation dans les inter-

valles de 50 à 200 paroissiens (51-100 et 101-200) qui deviennent en fin de simulation le mode principal de la distribution. Cet intervalle correspond aux paroisses rurales qui contiennent quelques agrégats ruraux de taille moyenne à faible (figure 6.8).

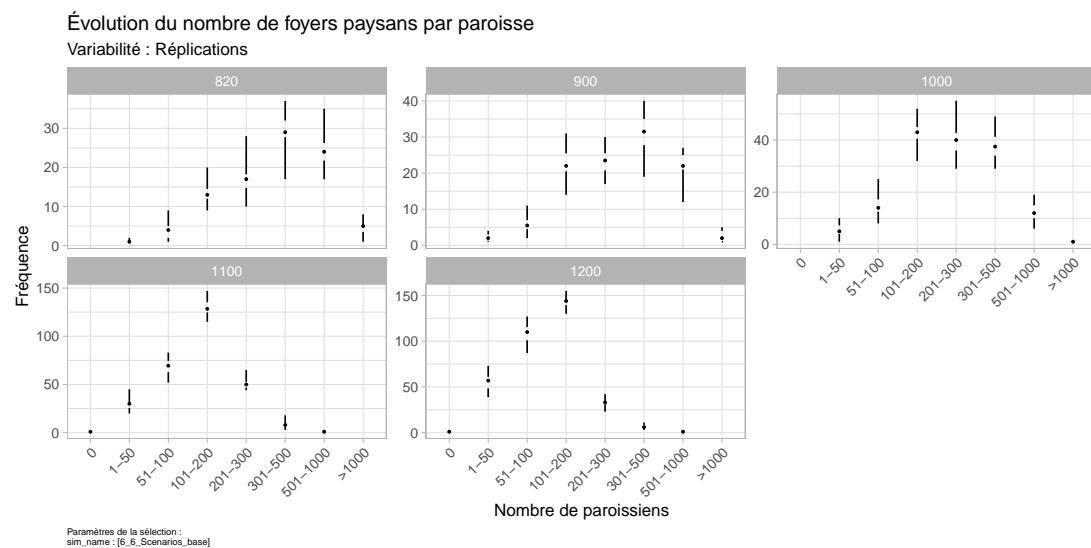


FIGURE 6.11 – Détail de la distribution hiérarchique des paroisses.

SimFeodal parvient donc bien à reproduire la double-densification du maillage paroissial. En milieu rural, le nombre de paroisses augmente jusqu'à assurer une desserte équitable des foyers paysans qui dans le même temps ont tendance à se concentrer, et en milieu urbain, le nombre de paroisses augmente aussi jusqu'à uniformiser le nombre de foyers paysans par paroisse entre 200 et 300.

Dans l'ensemble, SimFeodal montre une bonne capacité à reproduire la hiérarchisation du système de peuplement. Avec les informations dont l'on dispose pour évaluer le modèle, on ne peut qu'être satisfait des tendances présentes dans cette version calibrée de SimFeodal. Le modèle reproduit en effet bien les faits stylisés estimés, même si ces derniers sont formalisés de manière plus floues que par exemple le phénomène de polarisation. Cette incertitude, ou au moins de manque de détail, est dû à la faiblesse de la documentation empirique sur ces questions thématiques : il est déjà difficile d'avoir une estimation des populations à cette période féodale, alors le détail de la forme de distribution de ces populations est une connaissance encore plus dure à estimer. À ce stade de maturité du modèle, il faudrait sans doute collecter de nouvelles sources historiques pour pouvoir raffiner le comportement du modèle, ou au moins, départager des simulations présentant de légères variations au niveau des indicateurs analysés dans cette sous-partie.

6.1.2.4 Capacité du modèle à simuler la fixation et la dissémination du peuplement

Dans ce dernier objectif thématique, on cherche à vérifier si le modèle parvient bien à reproduire le double processus de fixation des foyers paysans et de dissémination des peuplements dans l'espace.

Dans le modèle, ces processus devraient s'exprimer sous la forme d'un accroissement des migrations (restructuration) suivi d'une diminution nette (fixation). À niveau d'observation des agrégats, on devrait observer une couverture croissante, de plus en plus dense, du monde simulé.

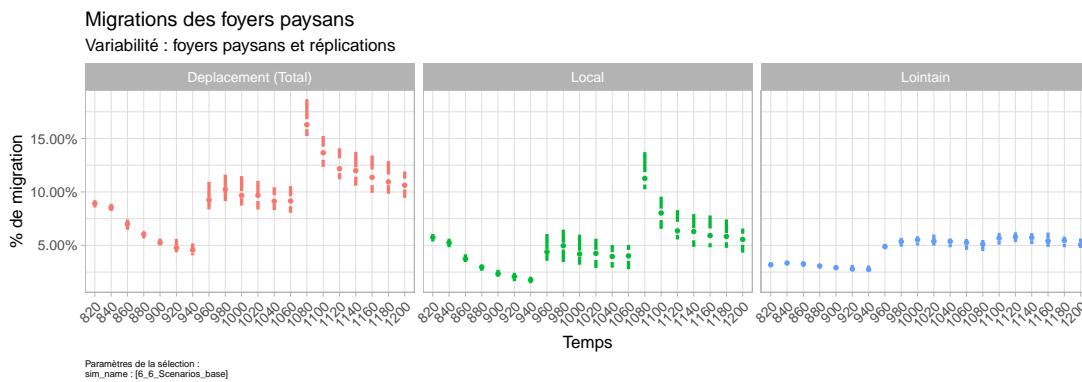


FIGURE 6.12 – Migration des foyers paysans.

Fixation des foyers paysans. La figure 6.12 illustre l'évolution des migrations, selon leur type (locale ou lointaine, cf. [chap 2, règles migrations](#)) au cours du temps. On y constate que le modèle produit un motif spécifique, composé de trois phases :

- Avant 960, les migrations diminuent de manière régulière, depuis près de 10% de migrations (total) jusqu'à 5%. Dans le modèle, cette période correspond aux premiers regroupements de foyers paysans. Ces derniers, initialement isolés, rejoignent des pôles locaux (églises rurales par exemple) et y constituent ainsi de petits agrégats ruraux locaux. Ils se fixent dans ces agrégats car il n'y pas encore véritablement de motif d'insatisfaction (religieuse ou de protection du moins).
- En 960, deux éléments exogènes viennent perturber le système : l'augmentation de la pression religieuse (diminution des seuils de distance aux églises) et de la pression de protection (nécessité de s'approcher des châteaux). En conséquence, le nombre de migrations bondit et retrouve son niveau de début de simulation (environ 10%). Le besoin de protection augmente régulièrement à cette période, et les foyers paysans sont donc sans cesse amenés à migrer, ce qui explique que ce niveau de migration semble stable jusqu'à la fin de cette deuxième phase¹⁰.
- Une nouvelle rupture survient en 1060, là encore en raison d'une augmentation, exogène, de la pression religieuse (les seuils acceptables de distance à l'église paroissiale diminuent encore jusqu'à devenir très restreints). À nouveau, les migrations (uniquement locales cette fois-ci) augmentent de manière abrupte, et, comme dans la première phase, tendent ensuite à diminuer : le niveau maximal d'exigences (religieuse, de protection) est atteint, et les migrations des foyers paysans y pallient.

10. Si de nouveaux éléments exogènes ne venaient pas à nouveau perturber le système après 1060, le niveau de migration diminuerait à son tour, comme avant 960.

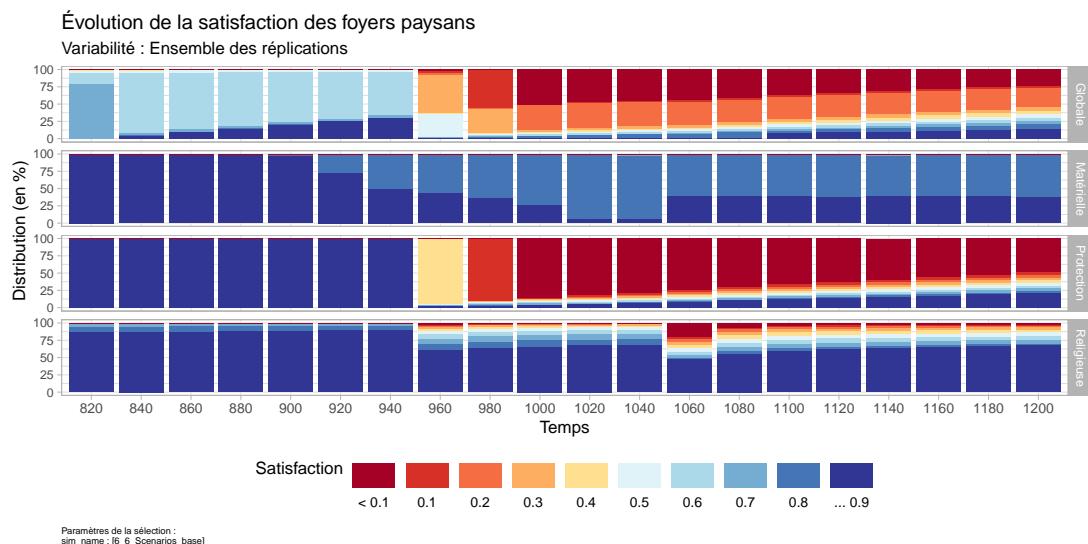


FIGURE 6.13 – Satisfaction des foyers paysans.

La lecture de la figure 6.13, qui présente les types de satisfaction des foyers paysans au cours de la simulation, vient appuyer cette analyse. On y retrouve les trois phases observées dans les sorties de simulation. Avant 960, la satisfaction augmente, et les migrations diminuent avec elle. En 960, c'est bien la satisfaction de protection qui diminue fortement, poussant les foyers paysans à migrer et déclenchant la seconde phase migratoire. En 1060, on retrouve le même effet, de moindre ampleur cependant, dans la satisfaction religieuse. À nouveau, les satisfactions diminuent et une nouvelle phase migratoire est initiée.

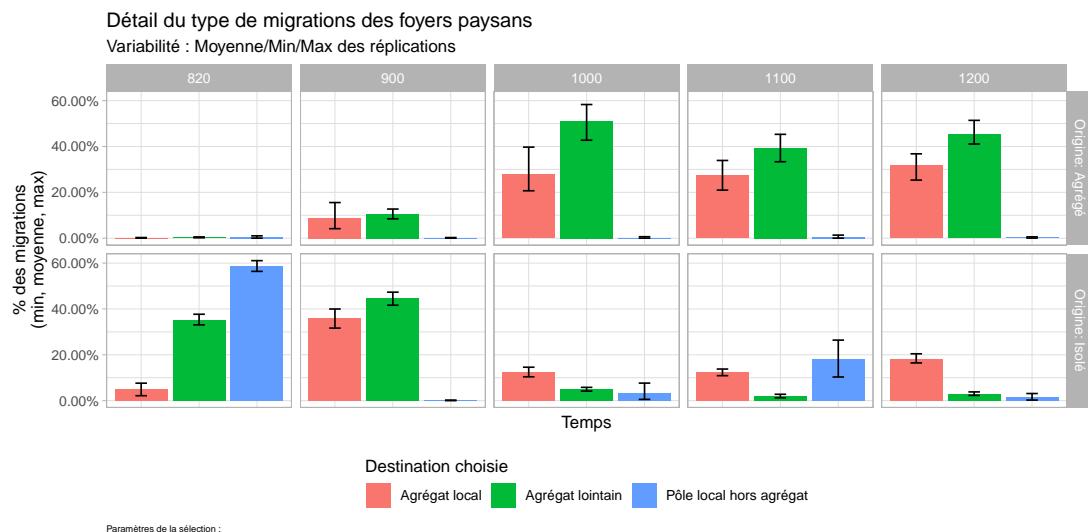


FIGURE 6.14 – Types de migration des foyers paysans.

En observant le détail des migrations (figure 6.14), non continu dans le temps contrairement aux graphiques précédents, on ne retrouve que deux périodes. La figure nous renseigne toutefois sur une autre dimension liée aux migrations, en fonction ici de l'origine et de la destination des foyers paysans. On peut alors préciser les observations précédentes : quels foyers paysans migrent, et où ?

En 820 et en 900, la plupart des migrations proviennent de foyers paysans isolés. Ces migrations, locales et lointaines, permettent aux foyers paysans de rejoindre un agrégat, quel qu'en soit la place dans la hiérarchie. En 1000 et

après, les foyers paysans isolés représentent encore une part substantielle de la population (50% d'après la figure 6.4), mais leur poids relatif dans les migrations est devenu bien plus faible que celui des migrations entre agrégats de population. Après une première période de concentration arrive une période de choix hiérarchique pour les foyers paysans, où les différences d'attractivité des agrégats jouent alors un rôle prépondérant. Cela indique aussi qu'à partir de cette période, les agrégats sont pour la plupart pérennes et voient alors se mettre une compétition en place.

Dissémination du peuplement. La répartition des paroisses, dans le modèle, constitue un observable intéressant pour évaluer la dissémination du peuplement. Comme les paroisses ont comme vocation de desservir la population des foyers paysans, elles constituent un proxy de sa répartition tout au long du temps. Les indicateurs liés (figures 6.15 et 6.16) donnent une lecture satisfaisante du processus de dissémination.

En premier lieu, on note que le nombre d'églises paroissiales augmente de manière régulière au cours du temps, avec un saut entre 1060 et 1080 (comme pour de nombreux indicateurs vu auparavant (figure 6.15). Par rapport aux logiques de création et de promotion, on remarque que le nombre d'églises non paroissiales chute fortement à la même période. Ces églises se voient attribuer les droits paroissiaux, et on peut dès lors affirmer que l'accroît de paroisses de 1080 correspond surtout à des églises rurales puisque ce sont elles qui sont susceptibles d'être promues par le mécanisme (voir [chap2](#), section 2.7.2.3).

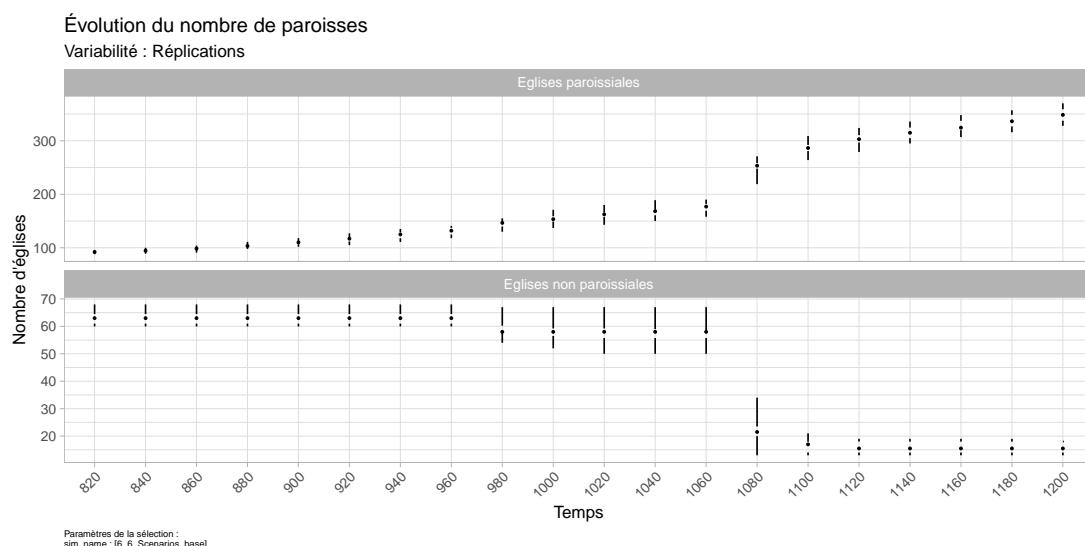
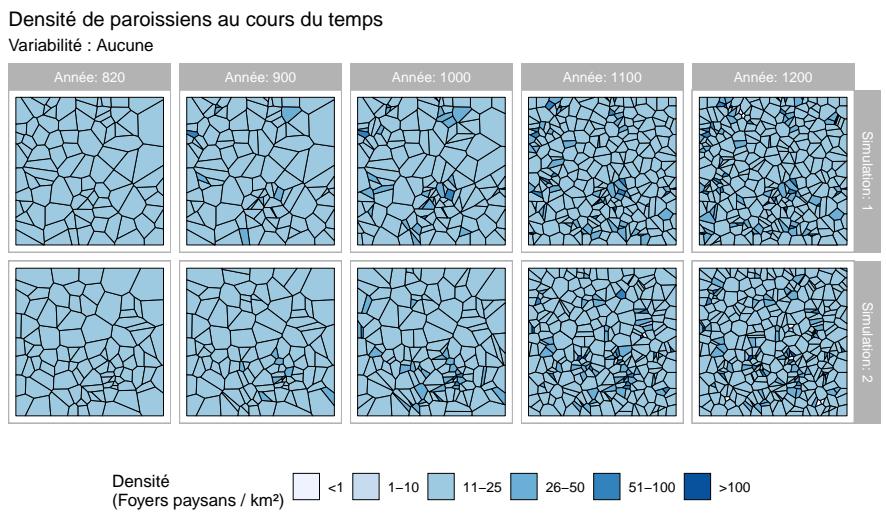
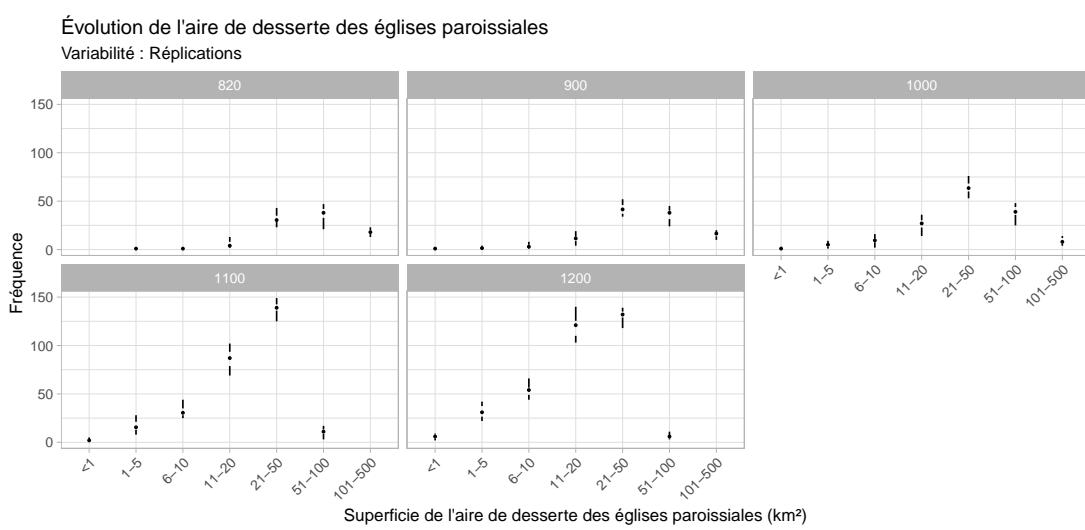


FIGURE 6.15 – Nombre de paroisses.

On constate nettement dans la figure 6.16a une densification généralisée du maillage paroissial. Cette densification est visible à deux niveaux. En premier lieu, le maillage est de plus en plus dense globalement : la superficie moyenne des paroisses diminue (visible aussi dans la figure 6.16b), et visuellement, on constate une certaine homogénéisation et normalisation des paroisses. Les très grandes paroisses initiales (plus de 50 km² dans la figure 6.16b), surtout situées dans les marges de la région, disparaissent progressivement à mesure qu'elles sont subdivisées par le mécanisme de création/promotion d'églises paroissiales rurales ([ref méca paroisse, chap2](#)).



(A) Densité des paroisses et des paroissiens.



(B) Superficie des paroisses.

FIGURE 6.16 – Indicateurs du maillage paroissial.

En second lieu, à l'échelle infra-régionale, on note une intensification très locale de paroisses (le maillage augmente fortement), dans lesquelles les densités de foyers paysans sont importantes. Ces densifications locales sont représentatives des agrégats les plus importants, qui peuvent comporter jusqu'à près d'une dizaine d'églises paroissiales¹¹.

Ces deux niveaux d'observation, combinés à la cartographie des agrégats (figure 6.7), montrent que le modèle produit bien une dispersion du peuplement dans l'espace : on voit des concentrations locales, mais à l'échelle globale, les mailles sont harmonisées par le bas, signe que des petits agrégats apparaissent dans l'ensemble du monde simulé.

11. On peut le constater dans la figure 6.6-a, où les pôles les plus importants de la hiérarchie contiennent une douzaine d'attracteurs. Si l'on considère que ces pôles contiennent un agrégat et un château, on peut en déduire qu'il y a aussi une dizaine d'églises paroissiales au service de cet agrégat.

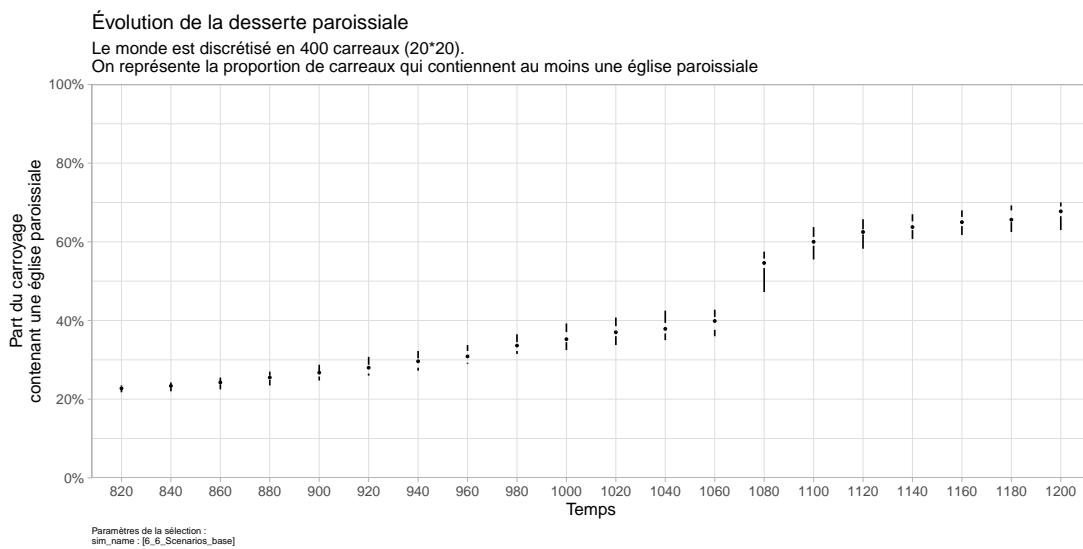


FIGURE 6.17 – Couverture de la desserte paroissiale.

Pour préciser cette mesure et obtenir un indicateur spatial agrégé des répliques¹², on peut quantifier la couverture de l'espace qu'occupent les églises paroissiales. Dans la figure 6.17, le monde simulé est discrétré en 400 carreaux de 4 km de côté et on procède à un comptage de la proportion de ces carreaux qui contiennent au moins une église paroissiale à chaque date. La lecture de la figure montre que la part du monde qui est située à proximité d'une église paroissiale augmente au cours du temps, avec un rythme comparable à celui de l'augmentation du nombre d'églises paroissiales (figure 6.15). Cela indique que l'augmentation du nombre de paroisses dans le modèle est bien un phénomène qui est réparti de manière homogène dans l'espace. SimFeodal est donc bien en capacité de reproduire *in silico* les processus de fixation et de dissémination qui ont été observés empiriquement en Touraine et plus généralement dans l'Europe du Nord-Ouest.

SimFeodal parvient ici entièrement à reproduire le double fait stylisé recherché : fixation et dissémination du peuplement. Pourtant, plus encore que pour les dimensions précédentes, il nous paraît extrêmement difficile d'aller plus loin dans le calibrage du modèle. La raison en est principalement la difficulté de l'évaluation quantitative de ces phénomènes. Parmi les indicateurs de sortie de simulation étudiés, ceux correspondant à cette dimension d'analyse sont les plus intrinsèquement spatio-temporels, et se prêtent donc mal à des agrégations synthétiques. Certes, le champ de l'analyse spatiale s'est en partie constitué pour répondre à ce type de problème, en trouvant des mesures synthétiques et variées permettant de décrire et de comparer des semis de points, correspondent-ils à des entités ou à des époques différentes.

Pourtant, et on y reviendra plus extensivement dans le chapitre suivant, on constate ici une limite de notre méthode d'évaluation des simulations, au vu des données et connaissances empiriques dont on dispose. Un espace théorique, simulé et très variable localement comme celui de SimFeodal se prête en

12. Au contraire des cartes, qui ne peuvent décrire que des simulations particulières, l'agrégation spatiale n'étant pas possible dans le monde théorique fluctuant qui est simulé (voir chap7, agrégation pour plus de précision).

effet mal à une agrégation de données. Les différentes réplications d'un modèle ne partagent ainsi pas véritablement de référentiel spatial commun en dehors des limites du monde simulé : les positions des agrégats, des églises, des paroisses, sont en effet incomparables d'une réplication à l'autre. Sans données empiriques susceptibles de préciser les taux d'occupation attendus, les mesures de dispersion des semis d'églises, de villages etc., on ne peut pousser l'évaluation visuelle plus avant.

6.1.3 Après le calibrage, comment affiner le modèle ?

Dans l'ensemble, l'analyse des résultats montre que cette version calibrée de SimFeodal répond aux attentes en matière de reproduction des faits stylisés identifiés d'après les connaissances expertes. Le modèle aboutit bien sur une polarisation de l'habitat, autour de pôles d'attractions très hiérarchisés et disséminés dans l'espace simulé. Cette polarisation débouche sur une structure spatiale pérenne, due à la fixation des foyers paysans au sein d'agrégats qui composent le système de peuplement.

Le modèle SimFeodal est donc satisfaisant vis-à-vis de ce pour quoi il a été conçu, développé et calibré. En comparant les dizaines de versions successives du modèle, ce constat est d'autant renforcé : chaque version a permis des améliorations notables, depuis une version 0 qui parvenait tout juste à une concentration du peuplement jusqu'aux versions plus récentes, préalables à la version 6.6 ici présentée, qui ont renforcé l'ajustement aux connaissances expertes chacune sur des points plus spécifiques. Certains indicateurs, toutefois, et en particulier les indicateurs quantitatifs qui donnent un aperçu global et synthétique des résultats du modèle (section 6.1.2.1), demeurent toutefois relativement éloignés des objectifs fixés. On pourrait donc chercher désormais à prolonger et affiner le calibrage du modèle afin que sa capacité à reproduire les faits stylisés soit améliorée.

Il nous semble toutefois que cette démarche ne vaudrait pas le temps et l'effort qu'il serait nécessaire de lui consacrer. Nous appuyons ce sentiment sur deux raisons principales, la première liée au domaine de l'empirie et la seconde au domaine du modèle.

Calibrer sans sur-ajuster. Dès le calibrage des paramètres d'*input* (section 6.1.1.1), on mentionnait les difficultés du recueil de sources empiriques – matérielles ou littéraires – pour des éléments qui paraîtraient pourtant triviaux et indispensables à tout géographe contemporain. La population de la région et son évolution sur la période considérée, par exemple, ne peut donner lieu qu'à une estimation très grossière. De plus, on ne peut avoir aucune garantie, ni même d'espoir, que de futures sources permettent de mieux les spécifier.

Dans le même temps, on cherche à améliorer l'ajustement des sorties du modèle à des objectifs fixés sur ces sources empiriques floues et lacunaires. L'expertise des thématiciens du groupe de modélisation de SimFeodal a permis de définir ces objectifs, mais ceux-ci présentent un niveau de précision parfois assez faible. Par exemple, on cherche à ce que SimFeodal puisse atteindre 20%

de foyers paysans isolés en fin de simulation. Les versions successives du modèle ont permis de faire descendre ce taux d'environ 60% à environ 20%. En considérant que les connaissances empiriques donnent une estimation plausible située entre 20% et 30%, quel sens y aurait-il à départager des modèles selon qu'ils atteignent 25% ou 27% ?

Ce problème, qui se pose pour chacun des objectifs et attendus du modèle, est un cas typique de sur-ajustement, ou « overfitting ». Sur le plan thématique, chercher à coller absolument à un objectif sans tenir compte du degré d'incertitude de ce dernier, bien plus élevé que celui que le modèle est en mesure de produire, n'a ainsi aucun sens. Sur le plan méthodologique, on peut aussi noter qu'à mesure que le calibrage du modèle progresse, les « gains » de chaque étape se font plus faibles. Chercher à améliorer le calibrage du modèle reviendrait alors à différencier des modèles sur des critères de plus en plus précis, alors même que le niveau de précision de ces critères est en lui-même statique et d'un ordre de grandeur inférieur.

Sans connaissances empiriques supplémentaires, il n'est pas possible de véritablement mieux calibrer SimFeodal, qui a déjà atteint un niveau de détail qui dépasse presque celui des connaissances expertes par le prisme desquelles tout résultat doit être étudié pour porter un sens.

Calibrer un modèle (très) complexe. Un autre élément concourt aussi à la difficulté d'améliorer le modèle, cette fois-ci directement lié aux choix de conception de SimFeodal. Comme décrit dans les deux premiers chapitres, SimFeodal est un modèle exploratoire, plus descriptif (KIDS) que parcimonieux. Les paramètres y sont très nombreux, de même que les mécanismes qu'ils ajustent. Les agents du modèle interagissent, et, avec eux, les mécanismes qui les caractérisent sont aussi entrecroisés et imbriqués. Si l'on a une connaissance parfaite de chaque mécanisme (puisque l'on les a conçus et implémentés), il est difficile d'avoir une connaissance de même ordre sur l'aboutissement de leurs interactions, c'est la raison d'être de la simulation.

Dans des modèles moins descriptifs, mêmes complexes, on peut avoir des idées relativement précises de la combinaison des mécanismes, et donc une bonne intuition des sorties de simulation qui en aboutiront. Dans un modèle comme SimFeodal, les paramètres sont trop nombreux pour que ce soit réellement possible, et les résultats contre-intuitifs ont été fréquents dans les différentes étapes de paramétrage et de calibrage du modèle. Ces éléments contre-intuitifs, surprenants, sont extrêmement stimulants du point de vue de la connaissance des effets du modèle. Ils placent les modélisateurs et évaluateurs dans une démarche abductive où l'identification de l'explication de ces contre-intuitions permet de mieux comprendre le fonctionnement effectif du modèle et à partir de là du système modélisé.

Dans la recherche d'un calibrage mieux adapté, cette approche abductive ne permet toutefois pas véritablement de progresser. À mesure que le calibrage se précise, la complexité du modèle apparaît renforcée. Comme dans le principe des vases communicants, une modification de valeur d'un paramètre est

presque systématiquement assortie d'une réaction imprévu (et imprévisible) sur un indicateur différent de celui sur lequel le paramètre devait agir. Chaque modification de paramètre devrait donc donner lieu à de nouveaux ajustements d'autres paramètres, jusqu'à obtenir un ensemble de valeurs de paramètres stable.

Pour améliorer le calibrage, et éviter ces allers-retours imprévisibles entre paramètres, il manque alors une vision plus globale des réactions engendrées par les modifications de chaque paramètre. Une telle vision permettrait de réorganiser les paramètres, pour chaque indicateur de sortie, en ensembles thématiques dont l'on ferait systématiquement co-varier les valeurs testées afin d'approcher de l'objectif de manière harmonisée. Pour mieux comprendre les aboutissements du modèle, il est dès lors nécessaire de l'explorer de manière plus systématique, en essayant de comprendre l'influence réelle de chacun des paramètres plutôt que de tâtonner, de manière experte certes, en agissant sur les paramètres qui nous semblent intuitivement les plus importants. Ce sont ces objectifs de compréhension plus fine du comportement du modèle que nous allons poursuivre dans la suite de ce chapitre, au moyen d'analyses de sensibilité.

6.2 Analyser la sensibilité de SimFeodal

Parmi les nombreuses méthodes dédiées à l'évaluation de modèles, il en est une que l'on retrouve dans tous les manuels et dans la plupart des articles dédiés à la présentation de modèles. Il s'agit de l'analyse de sensibilité, catégorie en fait plurielle qui regroupe l'ensemble des méthodes vouées à tester ou à explorer la stabilité d'un modèle face aux éléments qui le composent : poids des *inputs* dans les résultats obtenus ; variabilité des résultats selon les valeurs de paramètres choisies ; variabilité des résultats due à l'aléa etc. Ces méthodes sont extrêmement nombreuses et constituent presque un champ scientifique entier, lié à l'évaluation de modèles, soient-ils à base d'agents ou statistiques.

Parmi celles-ci, les méthodes les plus classiques (CROOKS et al. 2019, p. 257) visent à « déterminer l'influence des paramètres sur les sorties du modèle. » (GINOT et MONOD 2005, p. 75). Il s'agit de faire varier les valeurs des paramètres et de mesurer les écarts résultant dans les sorties. Le plus souvent, cette mesure est quantitative, par exemple sous la forme d'un « indice de sensibilité » qui dépend des variations des sorties mais aussi de l'amplitude de la variation des paramètres¹³.

Les analyses peuvent être menées paramètre par paramètre, en conservant par exemple des valeurs fixes pour un jeu de paramètre (issus de calibrage) de base et en faisant varier un unique paramètre à la fois (analyse de type OFAT, « *one factor at a time* »). On peut aussi procéder en croisant des valeurs pour tous les paramètres, c'est-à-dire en analysant la sensibilité du modèle aux interactions entre paramètres.

Les analyses de sensibilités sont largement recommandées comme une pratique indispensable à la validation de modèle : on les retrouve dans l'ensemble des schémas relatifs à la démarche d'évaluation du chapitre 3. Au-delà de la validation des modèles, ce type d'analyses constitue un outil extrêmement utile pour aider à la compréhension d'un modèle, sans nécessairement chercher à en quantifier la validité. Cette méthode repose sur l'exploration d'un modèle par le prisme de ses réactions face aux paramètres choisis, et permet ainsi de mener une étude approfondie de l'influence des paramètres. Dans certains modèles, une analyse de ce type a par exemple permis de rendre plus parcimonieux un modèle KISS, en mettant en lumière le peu d'influence d'un paramètre sur l'ensemble des sorties d'un modèle. C'est le cas dans le travail de thèse de Clara SCHMITT, où une analyse de sensibilité a révélé la relative inutilité de l'un des 6 paramètres mobilisés dans le modèle SimpopLocal (SCHMITT 2014, p. 224-225).

Dans le cadre d'un modèle exploratoire, où les très nombreux paramètres

13. Cette prise en compte de la variation des valeurs de paramètre, par exemple dans l'indice proposé par CROOKS et al. (2019, p. 258) et dérivé de celui de HAMBY (1994) (in O'SULLIVAN et PERRY 2013, p. 201), permet de s'assurer, lors de la comparaison de la sensibilité des paramètres, que les valeurs comparées sont bien comparables. Pour prendre l'exemple du modèle de Schelling, il s'agit de s'assurer qu'on ne compare pas une variation de 0,1% du seuil de tolérance avec une variation de 20% dans la part d'espace vide. Dans ces indices, les amplitudes des valeurs testées sont en fait normalisées.

comportent vraisemblablement une part de redondance, l'ambition n'est pas de rechercher à réduire la masse de paramètres à tout prix, mais plutôt d'aider à comprendre lesquels ont la plus grande influence sur le modèle.

Dans le cadre de SimFeodal, une analyse de sensibilité doit permettre de gagner en compréhension du modèle, et en conséquence, des dynamiques modélisées.

La nature exploratoire et descriptive de SimFeodal rend l'application des méthodes classiques de l'analyse de sensibilité assez difficile : les paramètres ne sont pas tous quantitatifs, certains fonctionnent par paires, par grappes etc. Dans cette partie, nous nous en tiendrons à une analyse de sensibilité grossière, orientée vers une évaluation visuelle, à l'instar des autres démarches d'évaluation du modèle mises en place. Nous nous inscrivons pleinement dans le raisonnement de Joanne HIRTZEL, d'autant plus que le dit raisonnement est tenu dans une thèse dont l'analyse de sensibilité de modèles descriptifs est l'un des enjeux principaux :

« Ces différents constats nous ont conduit à procéder à des analyses de sensibilité locales, avec la méthode OAT¹⁴, en modifiant les valeurs de chacun des paramètres les unes après les autres, toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire tous les autres paramètres étant fixés à leur valeur par défaut [...]. Ce choix n'est pas unique dans la modélisation individu-centrée : la méthode OAT est utilisée dans plusieurs travaux en géographie ou en écologie (Ginot et al., 2006 ; Sanders et al., 2006 ; Laperrière et al., 2009 ; Schouten et al., 2014).

Nous n'avons pas jugé indispensable le calcul d'indices de sensibilité pour étudier la sensibilité des résultats de simulation aux différents paramètres du modèle. Une analyse graphique à la manière de Sanders et al. (2006a), Laperrière et al. (2009) ou encore Schouten et al. (2014) nous a paru suffisante, dans un premier temps. Ainsi, pour reprendre les termes évoqués dans les deux sous-parties précédentes, l'analyse de sensibilité présentée dans ce chapitre est une analyse locale (OAT), avec des évaluations qualitatives de l'impact de l'incertitude émanant des valeurs de paramètres sur différents résultats de simulation. »

HIRTZEL 2015, p. 251-252

6.2.1 Méthodologie - Analyse visuelle de sensibilité.

Dans cette partie, nous décrivons et justifions brièvement la méthodologie mise en place pour l'analyse de sensibilité de SimFeodal. Les sources informatiques, précises, de la démarche sont disponibles dans le dépôt du modèle ([mettre URL dossier](#)). Le détail des paramètres, les outputs du modèle, les traitements et les sorties graphiques sont disponibles quant à eux à cette adresse : [depot these / anasensib](#)

14. [C'est un autre acronyme de « *one factor at a time* », identique à OFAT que nous utilisons dans cette partie.]

6.2.1.1 Calcul de la sensibilité.

Nous avons choisi de mener l'analyse de sensibilité de SimFeodal en empruntant l'approche *OFAT*, c'est-à-dire en faisant varier les paramètres un par un. Il convient en effet de rappeler que ce modèle est caractérisé par un nombre important de paramètres : près de 70. En ne choisissant que 5 valeurs pour chaque paramètre et pour croiser tous les paramètres, une analyse de type plan complet demanderait l'exécution de $5^{70} \times 20_{[\text{replications}]}$, soit environ 10^{50} simulations... Une approche plus simple, de type OFAT, nous paraît dès lors la seule à être applicable dans le cas de SimFeodal.

Paramètres. Dans une analyse de sensibilité, le premier choix à faire concerne les paramètres à analyser. Dans les modèles statistiques ou KISS, l'analyse de chacun des paramètres est une évidence. Dans des modèles plus descriptifs tels que SimFeodal (ou les modèles analysés par HIRTZEL (2015)), on procède souvent à une sélection des paramètres afin de réduire l'ampleur de la tâche. Par exemple, quand certains paramètres ont un ancrage empirique fort, on peut considérer qu'ils se comportent plus comme des constantes que comme des paramètres, n'auront jamais à varier, et ne requièrent ainsi pas d'être analysés.

Dans SimFeodal, on aurait pu par exemple se passer d'analyser les paramètres de contexte les plus inscrits dans les connaissances empiriques. Pourtant, comme nous envisageons d'éprouver le modèle sur des scénarios susceptibles de faire varier tous les types de paramètres, par exemple portant sur des régions et des périodes différentes, il nous a semblé important de tester aussi ces paramètres. On a opté pour une analyse de sensibilité de l'ensemble des paramètres du modèle. SimFeodal comporte dans les faits 70 paramètres, mais en pratique, certains n'ont aucun sens quand ils sont mobilisés seuls. Par exemple, deux paramètres définissent le rayon minimum et maximum des zones de prélèvement. Il n'y a pas grand sens à faire varier l'un sans l'autre. Dans l'analyse de sensibilité, nous considérons ces deux paramètres comme un unique paramètre à analyser, qui ne prend pas la forme d'une valeur numérique simple, mais plutôt celle d'une étendue.

Pour cette analyse de sensibilité, nous avons au final analysé 57 « paramètres », certains de forme numérique simple, d'autres sous formes d'étendues, et enfin quelques-uns ayant des structures plus complexes (étendues changeant au cours du temps par exemple).

Méthode. La méthode choisie est simple : on définit un jeu de paramètres de base, issu du calibrage, et pour chacun des paramètres, on exécute un ensemble de simulations en faisant varier ce paramètre autour de sa valeur de base. Comme pour toute simulation d'un modèle stochastique, il est indispensable de procéder à des réplications de ces simulations.

Comme le nombre de paramètres était déjà important, que le nombre de réplications (20) l'était lui aussi, on a choisi de mener une analyse de sensibilité assez réduite, en ne testant, pour chaque paramètre, que 5 valeurs différentes. Ce nombre amène déjà à l'exécution de $57_{[\text{paramètres}]} \times 5_{[\text{valeurs}]} \times 20_{[\text{réplications}]} =$

5700 simulations, ce qui est une quantité importante de simulations au regard de toutes celles qui ont été menées dans les étapes de paramétrage et d'évaluation visuelle du modèle.

Étendue. Dans une analyse de sensibilité classique, on cherche à tester des variations de paramètres comparables, c'est-à-dire centrées autour des valeurs par défaut et présentant des variations relatives de même ampleur. Par exemple, pour un modèle dont le premier paramètre vaut 10 et le second 100, on cherchera à répartir les valeurs testées de manière comparable : le premier paramètre sera testé aux valeurs [0, 5, 10, 15 et 20], et le second pour [0, 50, 100, 150 et 200].

Dans un cas réel, cette règle est difficile à suivre : on a ici pris l'exemple de paramètres quantitatifs « de stock », qui ne sont comparables qu'entre eux. Dans SimFeodal, certains paramètres ont des structures bien plus difficilement comparables, à l'instar des étendues plus haut. Comment rendre comparable cinq variations autour d'un stock de 10, et cinq variations autour d'une étendue de 1500 m à 5000 m ? L'étendue des possibles transformations pour ces étendues est bien plus important : diminution, augmentation, translation... Contrairement aux variables de stocks qui ne comportent qu'une dimension, les étendues sont en effet composées de deux dimensions, et la quantité de variation possibles suit donc une loi de puissance.

Ce problème se pose de manière plus importante encore pour les paramètres qui évoluent en fonction du temps. Par exemple, le paramètre qui agit sur la satisfaction protection des foyers paysans, a une valeur composite (de type *map*, voir code 2.1 dans le chapitre 2) qui vaut « 0 entre 800 et 940 ; 0.2 en 960 ; 0.4 en 980 ; 0.6 en 1000 ; 0.8 en 1020 ; et 1 à partir de 1040 ». C'est donc un paramètre à trois dimensions : une valeur (dimension 1) qui évolue selon des intervalles de temps (dimensions 2 et 3). Pour l'analyser dans son entiereté, il faudrait supprimer la variation en testant plusieurs valeurs, mais aussi changer le rythme de cette variation, en décaler l'étendue temporelle, en changer l'intensité etc. Sous bien des aspects, ce paramètre peut être considéré comme qualitatif, et les variations qu'on lui appliquera dans l'analyse de sensibilité ne peuvent être que très subjectives et intrinsèquement différentes.

Face à ces difficultés, nous avons adopté une position générale acceptant la subjectivité, la non-comparabilité, mais cherchant à explorer des valeurs « caractéristiques » pour ce type de paramètres : activation et désactivation du mécanisme associé, valeur de base, et augmentation et diminution de l'ampleur de la valeur de paramètre. Dans l'ensemble, les valeurs de paramètres choisies (mettre les tableaux en annexe) ne sont que peu comparables de manière numérique, mais elles apportent un éclairage précieux sur le comportement du modèle en fonction de ses paramètres.

Outputs. Le chapitre 5 donnait des ordres de grandeur de la masse des données produites par le modèle, autour de 10 Mo pour une simulation. Avec 5700 simulations, un enregistrement complet des données aurait représenté plus de 50 Go de données et plus de 50 milliards de lignes de données à pré-

traiter, intégrer et analyser dans la base de données.

Cette masse de données pose des problèmes techniques tant que méthodologiques. Sur le plan technique, les solutions de stockage et d'interrogation de données utilisées pour l'exploration des données ([chap 3.3](#)) ne sont pas adaptées à une telle masse, du moins sans avoir recours à des infrastructures physiques coûteuses (serveurs équipés de cartes graphiques extrêmement puissantes etc.). En termes de capacité d'archivage, il est donc obligatoire de réduire considérablement la masse des données.

Sur le plan méthodologique, l'exploration visuelle de milliers de simulations organisées selon les variations des valeurs d'une soixantaine de paramètres nous semble répondre à des caractéristiques très particulières. Les méthodes et outils d'exploration interactive mis en place jusque là ([chap 5.4](#)) ne sont pas adaptés à ce type d'usages. Nous avons donc choisi, par soucis de lisibilité, de réduire autant que possible la production d'indicateurs de sorties de simulations pour cette analyse de sensibilité.

Dans un premier temps, nous n'enregistrons l'état du modèle qu'à son pas de temps final (en 1200) plutôt que tout au long de son déroulement. L'analyse de sensibilité doit se concentrer sur aussi peu d'objectifs que possible, et il n'est pas véritablement gênant de perdre l'aspect dynamique et la possibilité de comparer les rythmes du changement entre les simulations. Pour les mêmes raisons, on a décidé de n'extraire que des données très agrégées du modèle. L'analyse de sensibilité s'appuie sur des résultats à l'échelle globale du modèle, et il n'est pas utile, à ce stade de l'analyse, d'enregistrer les indicateurs individuels relatifs aux agents du modèle.

Encadré 6.1 : Différencier indicateurs contextuels et émergents.

Dans les chapitres précédents, on a présenté de manière extensive les objectifs – dans tous les sens du terme – poursuivis par le modèle. On mobilise des indicateurs de sortie de simulation pour rendre compte de l'état du modèle, et le but est que ces indicateurs soient proches des objectifs empiriques formulés. Ces indicateurs peuvent être qualitatifs (courbes d'évolution...) ou quantitatifs (taux atteints en fin de simulation). En définissant un ensemble d'objectifs, qualifiés (allures de courbes, ordres de grandeur...) sinon quantifiés (les indicateurs numériques), on esquissait une grille d'évaluation du modèle.

Au sein de ces indicateurs de sortie de simulation, il est une distinction que l'on n'a pas encore réalisée, et qui nous semble indispensable pour l'analyse de la sensibilité du modèle, où il est nécessaire de réduire autant que possible la quantité d'indicateurs calculés : le distinguo entre des indicateurs que l'on pourrait caractériser comme « émergents », et d'autres qui pourraient être qualifiés de « contextuels ».

- Le premier type, les indicateurs émergents, sont les indicateurs les plus classiques en modélisation agent : on s'attache à leur évaluation parce qu'ils sont entièrement générés par la combinaison et

l'intrication des mécanismes du modèle. Parvenir à obtenir des valeurs proches de ce que l'on peut observer sur le plan empirique dans ces modèles est un critère de validation d'un modèle, et donc potentiellement un signe d'acquisition de connaissance thématique ou théorique. Par exemple, dans SimFeodal, le taux de foyers paysans dispersés en fin de simulation est un pur indicateur émergent : le modèle n'a nullement été paramétré ou calibré pour faire atteindre une certaine valeur à ce taux, et la valeur simulée donne des éléments d'interprétation thématique sur le modèle.

- Les indicateurs contextuels n'apportent aucune connaissance thématique. Ils remplissent un rôle de cadrage pour les indicateurs émergents : le modèle est paramétré et calibré pour que ces indicateurs parviennent à un résultat pré-décidé. Le calibrage des paramètres associés (c'est-à-dire des paramètres qui ont un impact majeur sur ces indicateurs) permet alors de définir un contexte dans lequel les indicateurs émergents pourront être exploités. Dans SimFeodal, le nombre de foyers paysans en fin de simulation est un exemple d'indicateur de contexte. Cette quantité est entièrement dépendante de deux paramètres (quantité initiale et taux de croissance), et peut ainsi être assimilée à un *input*, c'est-à-dire ici un contexte au sein duquel les autres indicateurs s'exprimeront.

Dans le tableau 6.2, nous présentons les indicateurs de sortie de simulation numériques présentés dans l'interface de SimEDB (voir chapitre 5) et distinguons les indicateurs émergents des indicateurs contextuels. Si ces indicateurs ont une cohérence à être présentés conjointement au sein de SimEDB – de par leur aspect synthétique –, leur traitement doit nécessairement être différent en matière d'évaluation du modèle. Dans le cadre d'une analyse de sensibilité où l'on essaye de n'enregistrer qu'un nombre très réduit d'indicateurs, il nous semble utile de ne pas conserver les indicateurs « de contexte ».

Indicateur de sortie de simulation	Valeur attendue	Type	Dépendances directes
<i>Nombre d'agrégats</i>	200	Émergent	–
<i>Nombre de châteaux</i>	50	Contextuel	probabilités de construction de châteaux (PS et GS)
<i>Nombre de gros châteaux</i>	10	Émergent	–
<i>Nombre de seigneurs</i>	200	Contextuel	paramètre dédié : (objectif_nombre_seigneurs)
<i>Nombre d'églises paroissiales</i>	300	Émergent	–
<i>Distance moyenne entre églises</i>	3 000 m	Émergent	–
<i>Part de foyers paysans isolés</i>	20 %	Émergent	–
<i>Augmentation de la charge fiscale des foyers paysans</i>	x 3	Émergent	–
<i>Nombre de Foyers Paysans</i>	50 000	Contextuel	nombre initial; taux de croissance
<i>Densité de population</i>	8 feux/km ²	Contextuel	nombre de foyers paysans; taille du monde

TABLEAU 6.2 – Les indicateurs de sortie de simulation quantitatifs de SimFeodal. Les lignées grises désignent les indicateurs « contextuels ».

On a choisi de mener l’analyse de sensibilité sur les indicateurs numériques synthétiques, présentés dans le tableau 6.2. Parmi ceux-ci, on a conservé uniquement les 6 indicateurs « émergents » (encadré 6.1) : nombre d’agrégats ; nombre de grands châteaux ; nombre d’églises paroissiales ; distance moyenne entre églises paroissiales ; part de foyers paysans isolés ; et augmentation de la charge fiscale.

Dans la construction et l’évaluation du modèle, ce sont ces indicateurs que l’on a le plus observés, et s’ils n’informent pas sur l’ensemble des objectifs thématiques du modèle, ils permettent au moins de qualifier sommairement son comportement d’ensemble.

Computation. Dans une analyse de sensibilité portant sur autant de simulations, la masse de données n’est pas la seule difficulté technique. Le temps de calcul représente ainsi un obstacle qui peut devenir un véritable point de blocage, tant il peut s’allonger jusqu’à devenir irréalisable. Sur un ordinateur individuel, avec les valeurs de paramètre issues du calibrage, chaque simulation demande en moyenne (basse) 5 minutes de calcul. Multiplié par les 5700 simulations requises, l’exécution des simulations nécessaires à l’analyse de sensibilité réclame alors un temps de calcul de près de 20 jours sur un ordinateur individuel, sans véritable droit à l’erreur sous faute d’avoir à recommencer ce quasi-mois de calcul.

Pour que cette analyse soit effectuée dans un délai plus raisonnable, nous avons utilisé les capacités de calcul d’un serveur du laboratoire ainsi que d’un

serveur de calcul géré par la TGIR Huma-Num¹⁵. En distribuant les exécutions de simulation sur la quarantaine de processeurs que compte ce serveur, tout en laissant tourner les simulations uniquement de nuit pour ne pas gêner les autres utilisateurs de cet équipement collectif, toutes les simulations requises ont été exécutées en 3 jours, ce qui représente un investissement temporel bien plus raisonnable.

6.2.1.2 Analyse Quantitative - Filtrage des paramètres

Devant la masse de paramètres à analyser, nous avons réalisé qu'il était difficile de mener une analyse visuelle directe de la sensibilité des paramètres. Il a été choisi de mener une première étape, quantitative, pour permettre de trier et de filtrer un sous-ensemble de paramètres dont une étude plus approfondie serait alors possible.

Pour cette étape, on a raisonné à l'échelle agrégée du paramètre, en cherchant à mesurer la variabilité des indicateurs de sortie choisis provoquée par la variation des valeurs de paramètres.

Normalisation des objectifs. Un premier problème est que les indicateurs de sortie de simulation choisis pour caractériser les objectifs dont les référentiels sont très différents. Une variation de 5 grands châteaux (objectif de 10) montre une sensibilité plus forte qu'une variation de 5 agrégats (objectif de 200). Il est alors nécessaire de procéder à un « centrage » des données issues de la simulation. Ce centrage peut être effectué, classiquement, sur les valeurs obtenues, pour obtenir une moyenne valant 0, comme on le fait lors d'une normalisation classique de données.

Pour l'étude de SimFeodal, nous avons préféré centrer les données de chaque indicateur relativement aux objectifs numériques identifiés. Par exemple, une simulation produisant 250 agrégats, quand l'objectif numérique est de 200, aura la valeur de +50 pour l'indicateur « nombre d'agrégats ». Cela permet de mesurer les comportements de manière plus thématique qu'un centrage statistique autour de 0. Pour chaque indicateur, on a soustrait à la valeur obtenue par simulation la « valeur attendue », déterminée thématiquement comme objectif (voir le tableau 6.1). Après cela, pour chaque indicateur pris individuellement, les données générées par chaque simulation deviennent comparables.

Pour atteindre une comparabilité plus importante entre des données hétérogènes, on procède aussi usuellement à une « réduction » des données, c'est-à-dire à la normalisation de leur variabilité (écart-type). Classiquement, cette étape consiste à diviser chaque résultat par l'écart-type. On obtient ainsi, pour chaque série de donnée, un écart-type de 1, qui permet alors de comparer la variabilité de ces séries hétérogènes. Comme pour le centrage, on a choisi de réduire les données en fonction de données connues plutôt qu'autour d'une valeur abstraite de 1. On a préféré pour cela se référer à nos données simulées de référence, c'est-à-dire issues des simulations présentées dans la première partie

15. www.huma-num.fr

de ce chapitre, après calibrage. Les données centrées ont ainsi été ensuite divisées par l'écart-type mesuré sur les simulations de cette version de référence, pour chaque indicateur numérique, plutôt que par l'écart-type des simulations issues de l'analyse de sensibilité.

Au final, ce procédé de normalisation est très proche d'une normalisation statistique classique, mais se base sur des valeurs qui ont un sens dans le modèle plutôt que sur les valeurs « abstraites » que constituent une moyenne à 0 et un écart-type de 1 : le référentiel est ici fixé à partir objectifs numériques, et la dispersion autour des résultats des simulations de la version calibrée du modèle présentée auparavant ([section 6.1](#)).

$$\text{valeur_normalisée}_{\text{indicateur}_i} = \frac{\text{valeur}_{\text{indicateur}_i} - \text{valeur_attendue}_{\text{indicateur}_i}}{\sigma(\text{valeurs_calibrées}_{\text{indicateur}_i})}$$

Ainsi conçue, la valeur normalisée permet de comparer entre les valeurs des indicateurs puisque les ordres de grandeur sont désormais similaires.

Calcul de la sensibilité globale des paramètres. Comme les valeurs sont désormais normalisées, il est possible de mener des opérations conjointes sur les différents indicateurs. On définit un indice global, intitulé « sensibilité », qui correspond à une moyenne, pour chaque paramètre, de ses valeurs normalisées dans chacun des indicateurs. Après le centrage, les valeurs deviennent négatives ou positives selon qu'elles sont inférieures ou supérieures aux objectifs. Pour un paramètre qui verrait des variations importantes, négatives et positives, le risque d'une moyenne est alors que la sensibilité calculée soit faible, le très positif compensant le très négatif. Pour prévenir ce risque, on a choisi de calculer la sensibilité sur les valeurs absolues des valeurs normalisées plutôt que sur leur valeur brute. La sensibilité de chaque paramètre peut alors être définie comme suit :

$$\text{sensibilité}_{\text{paramètre}_\alpha} = \frac{\sum |\text{valeurs_normalisées}_{\text{paramètre}_\alpha}|}{n_{\text{indicateurs}} \times n_{\text{valeurs_paramètres}_\alpha} \times n_{\text{réplications}}}$$

Sélection des paramètres à étudier. Après avoir calculé la sensibilité des paramètres, on sera en mesure d'en sélectionner un sous-ensemble que l'on pourra analyser, visuellement, de manière plus approfondie. Pour isoler ce sous-ensemble, on cherchera à conserver une dizaine des paramètres à la plus forte sensibilité globale. Le nombre précis dépendra de la forme de la distribution de la sensibilité des paramètres : on cherchera avant tout à isoler des paramètres dont la sensibilité les différencie franchement des autres. On se basera pour cela sur une méthode subjective d'examen visuel des écarts entre les valeurs de sensibilité, tel qu'on peut le faire pour choisir un nombre de classes à étudier lors de l'exécution d'une classification ascendante hiérarchique.

Un risque de cette sélection à partir de la sensibilité globale est que certains paramètres, très influents sur un indicateur particulier, auraient une sensibilité globale assez moyenne ou faible, effet de resserrement des moyennes oblige. Pour ne pas risquer de négliger de tels paramètres, on complètera la

sélection précédente par une sélection des trois paramètres les plus sensibles sur chacun des 6 indicateurs.

$$\text{sensibilité}_{\text{paramètre}_\alpha_{\text{indicateur}_i}} = \frac{\sum |\text{valeurs_normalisées}_{\text{paramètre}_\alpha_{\text{indicateur}_i}}|}{n_{\text{valeurs_paramètres}_\alpha} \times n_{\text{réPLICATIONS}}}$$

Une large partie de ces paramètres auront vraisemblablement déjà été isolés par le filtre sur la sensibilité globale, mais cette méthode devrait permettre de sélectionner quelques paramètres supplémentaires sur lesquels mener l'analyse visuelle. On évitera en cela de laisser de côté un paramètre ayant un effet important quoi que sur un nombre réduit d'indicateurs seulement.

6.2.1.3 Analyse visuelle

Une fois les paramètres à étudier sélectionnés, on pourra mener une analyse visuelle pour comprendre l'influence des paramètres sur les indicateurs de sortie du modèle. Le nombre de paramètres étant réduit, il sera possible d'analyser l'importance de cette influence (la sensibilité), mais aussi sa direction : en observant la réaction des indicateurs de sortie en fonction des valeurs de paramètre, on pourra noter le sens des corrélations (visuelles) entre valeurs de paramètres et valeurs des indicateurs obtenus.

Dans la figure 6.18, la sensibilité du paramètre α sur l'indicateur n (haut droit) en constitue un exemple. On peut y voir que les valeurs de paramètres (modalités α_1 à α_5) ont un effet sur l'indicateur, et que cet effet montre une corrélation visuelle positive : les valeurs de l'indicateur n augmentent dans le même sens que celles des modalités testées. Ce même paramètre α , produit un effet opposé sur l'indicateur 1 : la corrélation y apparaît négative.

Cette analyse visuelle de sensibilité s'inscrit dans une analyse à la fois technique et thématique de SimFeodal. Elle doit en effet permettre de gagner en compréhension sur les interactions entre paramètres et mécanismes. Cela devrait éclairer l'aspect technique, lié à la validation interne du modèle – tel paramètre que l'on pense jouer sur tel mécanisme se comporte-t-il bien comme attendu ? – et l'aspect thématique – est-ce que la taille du monde simulé a un effet sur le rythme de la polarisation générée ? –.

Visualisation. L'objectif est d'étudier, visuellement, pour chaque paramètre, comment une variation de ce dernier influence chacun des indicateurs. Pour cela, on représente la variation due aux réplications de chaque paramètre au moyen de représentations visuelles dédiées à la variabilité, comme des *box-plots* ou *violin-plots*. La figure 6.18 présente un exemple de mise en page de telles représentations graphiques afin de faciliter l'analyse de sensibilité visuelle.

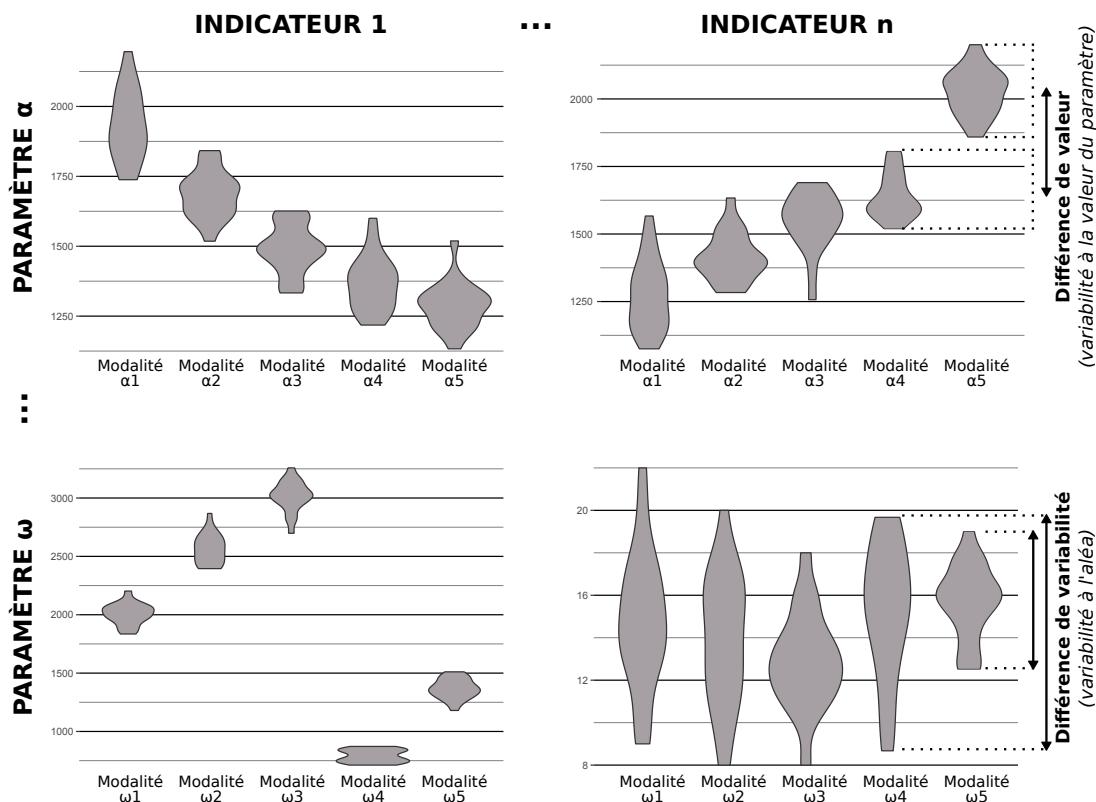


FIGURE 6.18 – Construction et mise en page de planches graphiques dédiées à l'analyse visuelle de la sensibilité de 5 modalités de ω paramètres sur n indicateurs.

Ces planches permettent de lire une double information. En premier lieu, la position relative des valeurs correspondant à chaque modalité permet de remarquer d'éventuelles influences des valeurs de paramètres sur les valeurs d'indicateur. Dans le schéma, on représente ainsi les « différences de valeur » qui expriment une variabilité à la valeur du paramètre (exemple en haut à droite). Dans un second temps, et on y reviendra après (section 6.2.4), le choix des représentations en *violin-plots* permet aussi d'étudier la variabilité interne des valeurs de paramètres testées sur chaque indicateur (exemple en bas à droite). Les différences d'amplitude (sur l'axe des ordonnées) exprime ainsi les différentes variabilités dues à l'aléa : plus les « violons » sont grands, plus l'indicateur varie selon les réplications pour la valeur de paramètre testée.

Normalisation. La normalisation des valeurs était indispensable lors du calcul de la sensibilité globale afin d'homogénéiser la variabilité des indicateurs. Pourtant, sur un sous-ensemble de paramètres cette normalisation devient un frein à l'interprétation et à la lisibilité des analyses : les valeurs des différents indicateurs n'étant plus exprimés dans l'unité d'origine, il est difficile d'en faire un commentaire thématique. L'analyse visuelle, sur les paramètres sélectionnés, sera ainsi présentée sur les valeurs brutes issues des simulations, et chaque graphique aura en conséquence un axe des ordonnées propre. La logique est encore une fois la même que dans les classifications ascendantes hiérarchiques couramment pratiquées en géographie quantitative : on effectue la classification sur des valeurs normalisées, mais on représente souvent les profils des classes en revenant aux valeurs brutes.

6.2.2 Sélection des paramètres à analyser.

Sensibilité moyenne des paramètres

Sensibilité : moyenne des valeurs absolues des valeurs normalisées

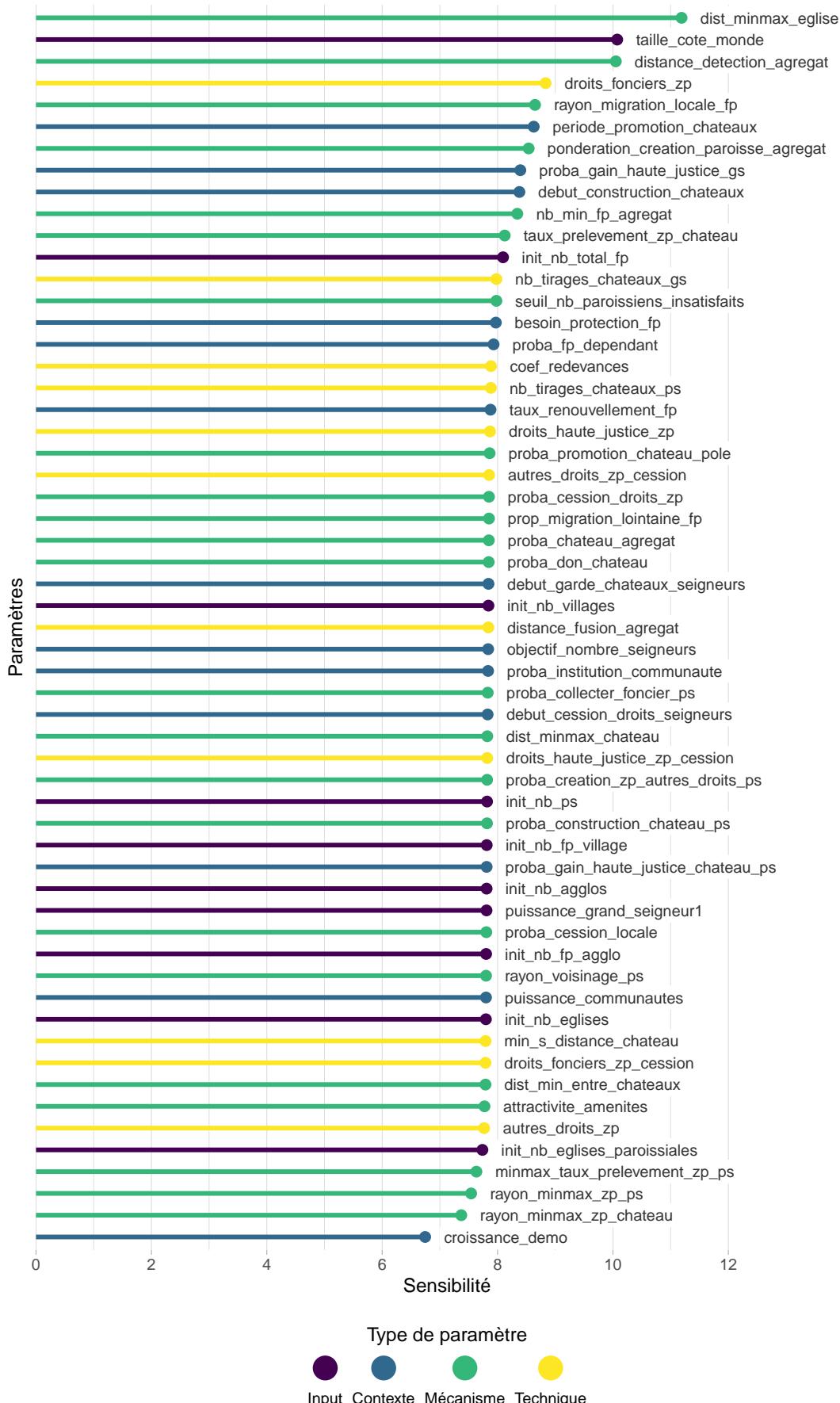


FIGURE 6.19 – Analyse de la sensibilité d'ensemble de tous les paramètres de SimFeodal.

La figure 6.19 présente les « scores de sensibilité » de chacun des paramètres du modèle. Ces paramètres sont classés par ordre descendant selon leur sensibilité globale, et la couleur reprend la typologie des paramètres.

On constate tout d'abord que la sensibilité des paramètres est relativement peu dispersée : les valeurs abstraites de la sensibilité varient entre près de « 7 » et « 11 », soit un écart maximal de 65%, là où on aurait pu imaginer que certains paramètres aient des sensibilités doublées, triplées... par rapport à d'autres. Cela indique que les paramètres ont tous une influence sur les sorties du modèle, influence qui est située dans le même ordre de grandeur. Par extension, on note qu'aucun des paramètres testés ne présente une sensibilité véritablement faible. Ce constat est renforcé en considérant que le paramètre le moins sensible globalement (`croissance_demo`) a une influence réelle sur le modèle, pour avoir notamment été testé plus extensivement en parallèle de cette analyse de sensibilité (voir ??). Pour le modélisateur, cette relative homogénéité des sensibilités est un résultat véritablement rassurant. Cela nous prouve qu'aucun paramètre n'est inutile, et ne devrait par conséquent être supprimé du modèle si on recherchait une parcimonie plus importante à cette étape.

Toujours à un niveau d'observation global, on peut remarquer que la sensibilité globale des paramètres ne semble pas liée aux types de paramètres. Visuellement, on constate en effet qu'il ne semble pas y avoir de motif particulier dans le positionnement des types représentés par les couleurs. En cela, le choix de mener l'analyse indistinctement sur tous les types de paramètres semble avoir été le bon.

En entrant dans le détail, on peut remarquer que trois paramètres se démarquent véritablement : les seuils de distance acceptables à l'église paroissiale la plus proche (`dist_minmax_eglise`), la dimension du monde simulé (`taille_cote_monde`) et le seuil de distance de détection des agrégats, en dessous duquel on considère que des foyers paysans peuvent former un agrégat (`distance_detection_agregat`). Il est intéressant de noter que les valeurs par défaut de ces paramètres ont toutes été choisies avec une précaution particulière.

- Le seuil de distance aux églises est un paramètre particulièrement complexe qui a donné lieu à de multiples allers-retours pour en fixer les valeurs. Sur la forme, c'est l'un des paramètres les plus « qualitatifs » : il désigne une étendue spatiale qui varie au cours du temps de la simulation. Comme la satisfaction religieuse que ce paramètre conditionne a une importance majeure sur les migrations des foyers paysans (voir section 6.1.2.4), on pouvait s'attendre à ce qu'il se montre particulièrement sensible.
- Les dimensions du monde simulé ont donné lieu à un calibrage, par ajustement empirique, dont l'on a discuté au début de ce chapitre (section 6.1.1.1). On décrivait alors toutes les répercussions que ce changement avait provoqué, et il n'est pas surprenant que ce paramètre soit parmi les plus sensibles dans le modèle.
- La distance de détection des agrégats a été l'un des premiers paramètres implémenté dans le modèle, ajusté selon des valeurs empiriques. La va-

leur fixée (100 m) n'a pas évoluée depuis les premières versions du modèle. C'en est presque une constante et il est très enrichissant pour le modélisateur de découvrir que ce paramètre a une influence importante sur l'issue des simulations.

Au sein des paramètres qui suivent immédiatement ce trio, les ruptures sont moins nettes et l'on découpera donc ce continuum entre les paramètres situés en 10^e et 11^e position (nb_min_fp_agregat et taux_prelevement_zp_chateau), où l'on discerne visuellement un nouveau saut dans les valeurs de sensibilité. Sur ces 57 paramètres, cette sélection en isole donc 10, auxquels on ajoute une sélection des trois paramètres ayant la plus forte sensibilité sur chacun des indicateurs. Comme ces derniers sont en bonne partie redondants avec les autres sélections, on obtient finalement un total de 14 paramètres à analyser visuellement par la suite. Ces paramètres, leur description complète ainsi que les valeurs testées sont présentées dans le tableau 6.3.

Limites de cette approche de sélection. Avant de passer à l'analyse détaillée des paramètres isolés, il nous paraît important de noter une limite substantielle de la méthode mise en place pour leur sélection. La mesure choisie, consistant en une sensibilité normalisée, ne tient pas compte de l'étendue des valeurs de paramètres testées. Ces étendues sont largement incommensurables, qui plus est quand il s'agit de comparer des paramètres numériques simples (la taille des côtés du monde simulé) à des paramètres plus qualitatifs (les seuils de distance évolutifs de la distance aux églises paroissiales). On peut par exemple noter que dans les 10 paramètres jugés les plus sensibles, 4 portent sur des valeurs testées « qualitatives » (étendues, variables au cours du temps..., voir p. 280), alors que ces paramètres ne représentent que 20% de l'ensemble des paramètres testés.

Lors du choix des valeurs de paramètres à tester pour cette analyse de sensibilité (**disponibles dans l'annexe N**), certains paramètres auront forcément été testés sur des valeurs plus ou moins éloignées des valeurs par défaut issues du calibrage. Cet éloignement se traduit forcément par des sensibilités mesurées très variables. On peut illustrer ce biais en comparant un paramètre de stock simple qui se montre très sensible (la taille du monde simulé à nouveau) et un paramètre de ratio qui se situe lui tout en bas du classement (le taux de croissance démographique, croissance_demo).

- Pour le premier, les valeurs testées s'échelonne régulièrement entre 50 et 150 km. L'ordre de grandeur de ces valeurs est similaire, représentant une variation qui va environ de la division par deux à la multiplication par deux de la valeur par défaut (80 km).
- Pour le second, qui vaut 0% par défaut, les valeurs testées sont de 0%, 1.53%, 3.72%, 5.89% et 12.89%. Au regard du nombre de pas de temps, cela représente un doublement, un triplement, un quintuplement et enfin un décuplement de la population initiale, que l'on a fait covarié pour que la population finale soit systématiquement identique. Vis-à-vis du paramètre précédent, l'étendue interprétée est plus large, consistant même en une activation ou non du mécanisme de croissance démographique. En absolu, les 4 premières valeurs sont cependant très proches et on ne

s'attend ainsi pas à ce qu'elles aient un effet majeur sur les sorties du modèle.

Un autre exemple de cette incomparabilité des étendues concerne le choix des valeurs à tester pour les paramètres techniques. Par définition, ceux-ci ont des valeurs qui ne représentent strictement rien d'un point de vue thématique. Leur étendue acceptable est alors extrêmement difficile à évaluer, et on aura ainsi pu avoir tendance à effectuer de mauvais jugements sur les valeurs testées de ces paramètres.

Ces biais dans la comparabilité des valeurs de paramètres testées ont forcément influencé la sélection des paramètres à analyser. En changeant les valeurs testées, le classement des paramètres aurait sans doute été largement altéré. Dans l'incapacité de produire des valeurs de paramètres plus comparables, nous nous tiendrons toutefois à la sélection des paramètres « les plus sensibles » effectuée dans cette partie. Tous les paramètres peuvent toutefois être analysés individuellement, de manière interactive, dans la partie dédiée de la plate-forme SimEDB (figure 6.20) : **Mettre un lien direct.**

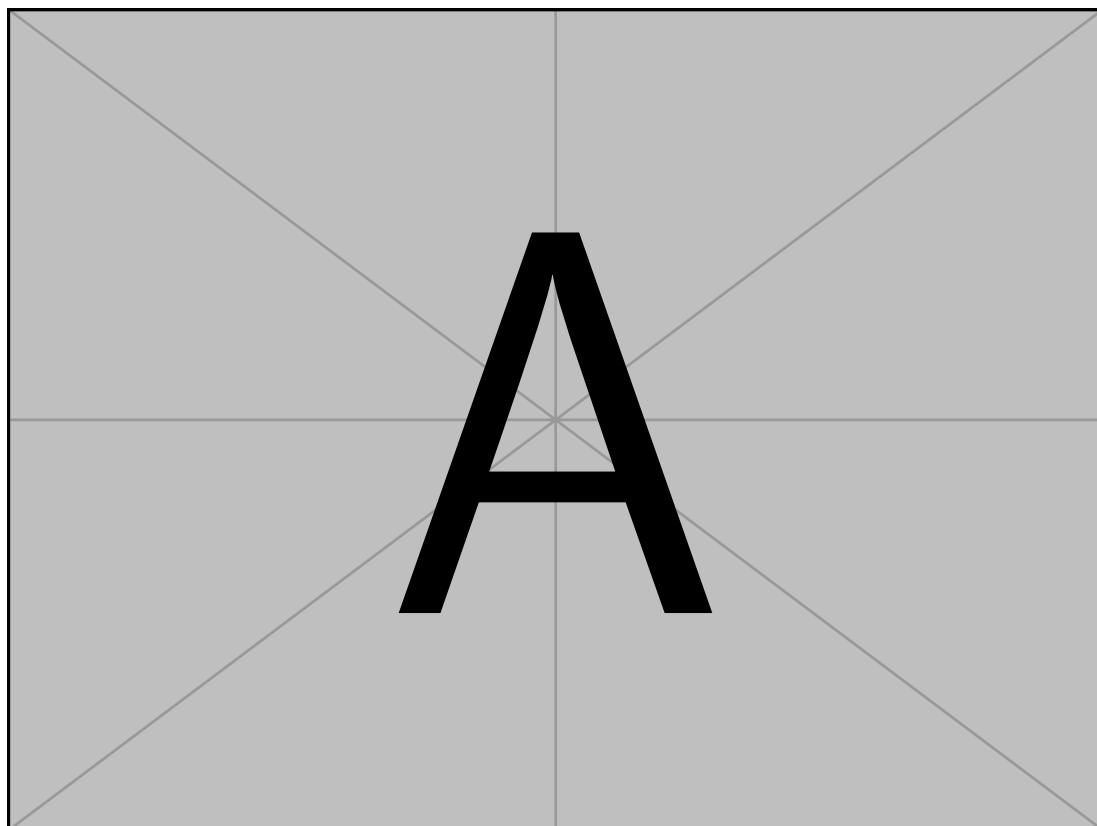


FIGURE 6.20 – Partie de l'interface de SimEDB dédiée à l'exploration visuelle des résultats de l'analyse de sensibilité de SimFeodal. **A faire**

Description	Intitulé	Type de paramètre	Agents caractérisés	Valeur par défaut	Valeurs testées	Origine de la sélection	Rang sensibilité
Étendue variable au cours du temps) dans laquelle un foyer payan calcule sa satisfaction religieuse	dist_minmax_eglise	Mécanisme	Foyers payans	Avant 960 : de 5km à 25km Entre 960 et 1060 : de 3 à 10km Après 1060 : de 1.5 à 5km	- Valeur par défaut : base - Entre 5km et 25km tout au long : statique.large - Entre 1.5km et 5km tout au long : statique.reduit - Avant 960 : [1,5, 5], de 960 à 1060 : [1, 3], après : [0,5, 1,5] : dynamique.reduit - Avant 960 : [25, 50], de 960 à 1060 : [10, 25], après : [5, 10] : dynamique.large	Globale	1
Dimensions de l'espace du modèle en km de côté. (Une marge de 1km de large est ôtée dans les simulations afin d'éviter les effets de bord).	taille_cote_monde	Input	Monde	80	[50,75,100,125,150]	Globale	2
Distance maximale entre les foyers payans et les attracteurs les plus proches pour qu'ils soient considérés comme faisant partie d'un même agrégat	distance_detection_agregat	Mécanisme	Aggrégats	100 m.	[50, 100, 150, 200, 300]	Globale	3
Prélèvement de droits fonciers : montant des redevances perçues par le seigneur détenteur de la zone de prélèvement pour chaque foyer payan assujetti	droits_fonciers_zp	Technique	Seigneurs	1	[0, 0.5, 1, 1.5, 2]	Globale	4
Rayon de distance dans lequel un foyer payan effectue une migration locale	rayon_migration_locale_fp	Mécanisme	Foyers payans	[800:-2500] : 2500m tout au long	-2500m tout au long : base -1000m tout au long : statique.reduit -1000m jusqu'à 1000, puis 5000m : dyn.croissant -1000m jusqu'en 1000, puis 2500m : dyn.reduit -5000m jusqu'en 1000, puis 10000m : dyn.large	Globale	5
Période au cours de laquelle les châteaux peuvent devenir des gros châteaux	periode_promotion_chateaux	Contexte	Châteaux	de 940 à 1040 inclus 940-1200 1100-1200 1000-1100 940-1000	940-1040 940-1200 1100-1200 1000-1100 940-1000	Globale	6
Pondération (en nombre de foyers payans) de la probabilité qu'une nouvelle église paroissiale soit créée au sein d'un agrégat	ponderation_creation_paroisse_agregat	Mécanisme	Églises	2000	[500, 1000, 2000, 3000, 5000]	Globale	7
Probabilité pour un grand seigneur d'acquérir des droits de haute justice à chaque pas de simulation.	proba_gain_haute_justice_gs	Contexte	Seigneurs	Avant 900 : 0 Entre 900 et 980 : 0.2 A partir de 1000 : 1	0 tout au long : statique.nul 1 tout au long : statique.fort Graduel défaut : base 0 + 0.1 / an à partir de 900 : croissant.regulier 0 avant 1000, puis 0.5 : croissant.seuil	Globale	8
Date à partir de laquelle des châteaux peuvent être construits par les seigneurs	debut_construction_chateaux	Contexte	Châteaux	940	[820, 880, 940, 1000, 1060]	Globale	9
Nombre minimum de foyers payans nécessaires pour constituer un agrégat	nb_min_fp_agregat	Mécanisme	Aggrégats	5	[3, 5, 7, 10, 15]	Globale	10
Proportion de foyers payans s'acquittant de droits dans chaque zone de prélèvement relevant d'un château (droits fonciers, droits de haute justice et autres droits)	taux_prelvement_zp_chateau	Mécanisme	Seigneurs	1 (100%)	[0, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1]	ratio_charge_fiscale	11
Nombre de tirages successifs de la probabilité qu'un des petits seigneurs crée un château.	nb_tirages_chateaux_ps	Technique	Châteaux	1	[0, 1, 2, 3, 4]	nb_grands_chateaux	18
Probabilité, pour un petit seigneur, de créer une nouvelle zone de prélèvement d'autres droits dans son voisinage à chaque pas de simulation	proba_creation_zp_autres_droits_ps	Mécanisme	Seigneurs	0.15 (15%)	[0,0, 0.05, 0.15, 0.25, 0.35]	distance_eglises_paroissiales	36
Taux de croissance du nombre de foyers payans à chaque pas de simulation	croissance_demo	Contexte	Foyers payans	0	avec variation pop.init. pour pop 40k final constante : croissance_demo : 0.0 & init_nb_total_fp : 40000 croissance_demo : 0.1289 & init_nb_total_fp : 4000 croissance_demo : 0.0589 & init_nb_total_fp : 15500 croissance_demo : 0.0372 & init_nb_total_fp : 20000 croissance_demo : 0.0153 & init_nb_total_fp : 30000	ratio_charge_fiscale	57

TABLEAU 6.3 – Paramètres sélectionnés pour l'analyse visuelle.

6.2.3 Évaluation visuelle de la sensibilité

Plutôt que de mener l'évaluation de la sensibilité des paramètres sélectionnés de manière linéaire, paramètre après paramètre, nous présentons ces derniers organisés par thématique c'est-à-dire selon les types d'agents concernés par chacun d'entre eux.

6.2.3.1 Paramètres liés au monde simulé

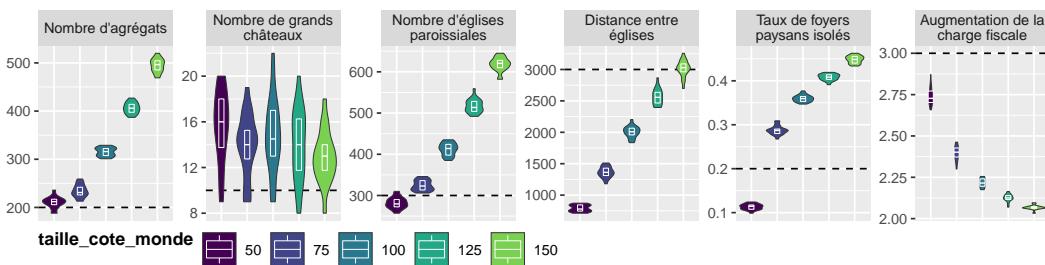


FIGURE 6.21 – Sensibilité à la taille du monde simulé.

Le paramètre régissant la taille du monde simulé est un paramètre majeur qui affecte la totalité des indicateurs étudiés, comme la figure 6.21 permet de le constater. Quand la taille du monde simulé augmente, le nombre d'agrégats, d'églises paroissiales, la distance moyenne entre églises paroissiales et le taux de foyers paysans augmente aussi. Au contraire, la pression fiscale varie de façon inverse : quand la taille du monde simulé augmente, elle diminue. On ne constate pas d'effet direct ou linéaire sur le nombre de grands châteaux, qui ne semblent pas être directement sensibles à la taille du monde. Les différences visuelles de position semblent surtout influencées par la forte variabilité liée à l'aléa que l'on constate sur cet indicateur de sortie de simulation.

Ces résultats sont assez intuitifs : plus le monde est restreint, plus les foyers paysans sont proches les uns des autres. Cela entraîne premièrement une concentration plus forte, mais aussi un nombre d'agrégats plus faible : au lieu d'être dispersés en une multitude de petits agrégats (500 en moyenne avec un monde de 150 km de côté), les foyers paysans se concentrent dans un nombre restreint d'agrégats (200 quand le côté est de 50 km), de superficie vraisemblablement supérieures par les effets des mécanismes de fusion des agrégats. En effet, quand la superficie d'ensemble est plus faible, toutes choses égales par ailleurs concernant le nombre et le rayon des zones de prélèvement, on assiste nécessairement à une superposition plus importante de ces zones. La charge fiscale des foyers paysans s'en retrouve fortement affectée.

Un effet de ce paramètre nous paraît légèrement contre-intuitif : avec une surface plus importante, il est entièrement logique que la distance entre les églises augmente, puisque celles-ci sont forcément plus dispersées dans un monde plus large. Pourtant, le nombre d'églises paroissiales croît aussi avec la superficie du monde simulé, ce qui ne nous semble pas découler directement des règles de création/promotion de nouvelles églises paroissiales. On peut interpréter ce comportement comme une conséquence imprévue et non linéaire de la dispersion des foyers paysans au sein de petits agrégats. De petites églises paroissiales sont mécaniquement créées ou promues en plus grand

nombre dans les zones faiblement peuplées (petits agrégats proches du seuil minimal), là où la création d'une paroisse est moins coûteuse (en termes de nombre de foyers paysans requis) qu'au sein des agrégats plus importants. En renforçant le nombre d'agrégats, le paramètre de taille du monde simulé agit ainsi de manière indirecte sur le nombre d'églises paroissiales.

6.2.3.2 Paramètres liés aux foyers paysans et agrégats

Les foyers paysans (et les agrégats de population qui résultent de leur concentration) sont, par hypothèse, les agents les plus déterminants dans l'évolution des structures spatiales observées dans SimFeodal. À ce titre, il est attendu (et sécurisant en termes de validation interne) que les paramètres contrôlant leurs mécanismes propres aient une influence nette sur les indicateurs de sortie analysés.

Foyers paysans. Les trois paramètres, spécifiquement liés aux foyers paysans, les plus sensibles (figures 6.22 à 6.24), embrassent trois aspects bien différents des mécanismes gérant le comportement des foyers paysans.

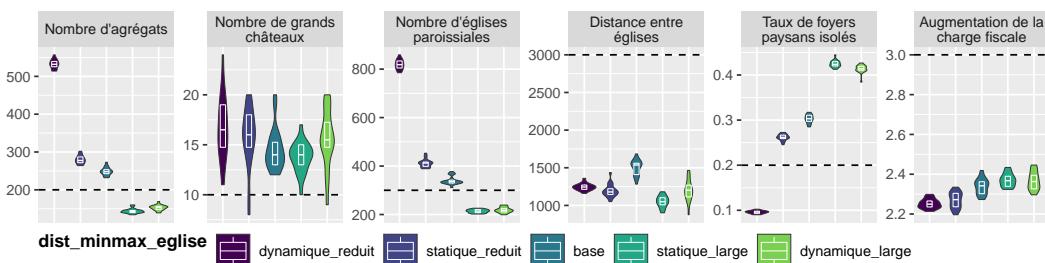


FIGURE 6.22 – Sensibilité du paramètre `dist_minmax_eglice`.

Le premier de ces paramètres ((figure 6.22), qui est aussi le plus sensible du modèle, joue sur la satisfaction religieuse des foyers paysans. Notons déjà que le calibrage de ce paramètre semble efficace : au moins sur les quatre premiers indicateurs, c'est la valeur par défaut dans le modèle qui approche le plus les objectifs fixés. En matière d'interprétation, le fait que ce paramètre ait une influence sur les indicateurs de sortie du modèle est attendu et intuitif. La satisfaction religieuse que ce paramètre conditionne, est en effet, intentionnellement l'un des éléments majeurs du modèle.

Pourtant, l'ampleur de cette influence est un peu plus forte qu'on aurait pu le penser au vu des mécanismes et résultats principaux du modèle. Dans la ?? qui présentait l'évolution de la satisfaction des foyers paysans, on remarquait que la satisfaction protection était la composante principale de la satisfaction globale. On aurait donc pu s'attendre, au regard des mécanismes implémentés, à ce que les paramètres liés à la satisfaction protection aient une sensibilité supérieure à celui-ci.

Pour ce paramètre qui régit les seuils de distance acceptables à l'église paroissiale la plus proche, on peut émettre l'hypothèse que les valeurs testées biaissent la mesure de la sensibilité globale. Ces valeurs sont qualitatives (étenues plus ou moins importantes, variables ou non au cours du temps, cf. le tableau 6.3), ont une large influence sur les aspects liés à la concentration des

foyers paysans, et leur action sur les autres indicateurs est moins linéaire et prévisible.

Plus les étendues testées sont restreintes (modalités « dynamique_reduit » et « statique_reduit »), plus le nombre d'agrégats et de foyers paysans isolés est important. Pour ceux-là, la satisfaction religieuse joue à ce moment là le rôle limitant et « force » les foyers paysans à migrer à proximité d'églises paroissiales.

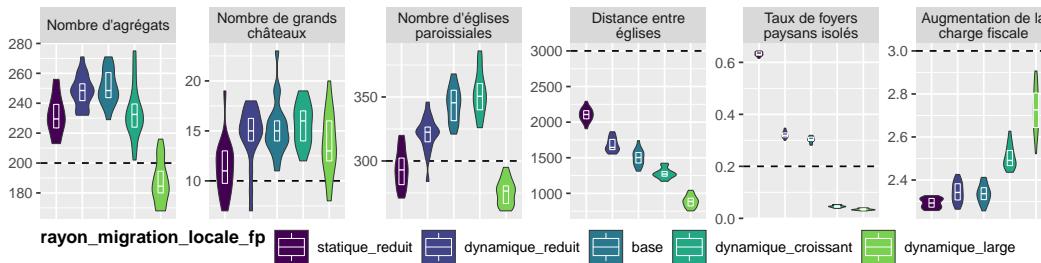


FIGURE 6.23 – Sensibilité du paramètre `rayon_migration_locale_fp`.

Cette migration, au moins pour l'aspect local, est largement influencée par le second paramètre de la sélection : le rayon maximal de migration locale des foyers paysans (figure 6.23). Celui-ci n'est pas une étendue, mais un rayon maximum qui peut (valeurs « dynamiques ») changer au cours du temps. Dans le modèle calibré, ce rayon est fixe au cours du temps (2 500 m, modalité « base »). Dans des versions précédentes du modèle, les valeurs de ce paramètre augmentaient au cours du temps¹⁶, et on a voulu tester l'influence de l'évolution de ces valeurs (modalités « dynamique_reduit » et « dynamique_croissant ») ainsi que d'augmentations et diminutions du rayon (modalités de type « reduit » par opposition à « croissant » et « large »).

Ce paramètre a notamment un rôle déterminant sur la concentration des foyers paysans, puisque selon les valeurs éprouvées, cet indicateur peut passer en moyenne de plus de 60% à moins de 5%. Les effets sur le nombre d'agrégats, de grands châteaux et d'églises paroissiales ne sont pas directement linéaires. C'est un exemple typique de paramètre qui régit un mécanisme dont les interactions avec les autres suit des effets de seuils. Sur les indicateurs de sortie, cela résulte en des tendances diverses selon l'ordre de grandeur des seuils empruntés.

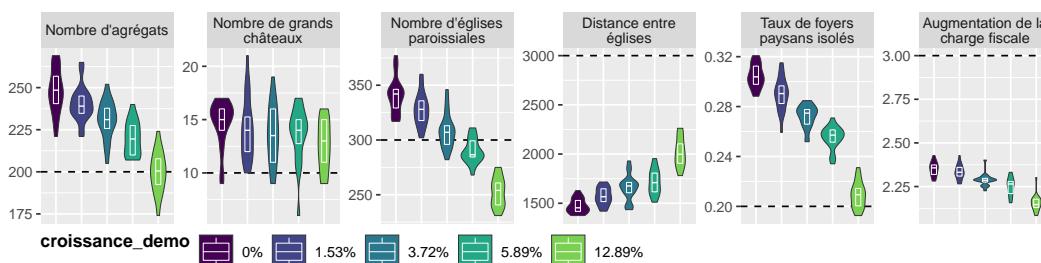


FIGURE 6.24 – Sensibilité du paramètre `croissance_demo`.

Le paramètre de croissance démographique régit un mécanisme particulier dans le modèle, puisque par hypothèse, on a choisi de considérer une popula-

16. Reproduisant ainsi *in silico* la diminution des coûts de distance-temps qui témoignent de l'intégration d'un système de peuplement.

tion stable dans le déroulement du modèle (ref chap 2, là où j'explicite, sans doute inputs/situation initiale).

Ce paramètre est considéré comme relevant du contexte, mais aurait également entièrement sa place parmi les *inputs* tant son importance thématique est majeure. La très faible sensibilité globale de ce paramètre (figure 6.19), ne nous paraît pas représentative de son influence effective tant l'analyse visuelle de son influence sur les indicateurs de sortie (figure 6.24) montre un effet direct sur tous les indicateurs présentés (à l'exception du nombre de grands châteaux).

On peut constater que plus le taux de croissance est élevé, plus le nombre d'agrégats est faible, de même que le taux de foyers paysans isolés. Sur les deux paramètres précédents (figures 6.22 et 6.23), de même que plus globalement, ces deux indicateurs sont pourtant le plus souvent opposés : quand le nombre d'agrégat augmente, le taux de foyer paysans isolés diminue.

L'influence de ce paramètre est extrêmement intéressante pour le modèle tant ce paramètre permet d'approcher des objectifs de ces indicateurs qui sont tous deux dépassés alors qu'opposés. On notera par exemple que parmi les valeurs de croissance démographique testées, la plus forte (12.80%) permet un excellent ajustement du nombre d'agrégats et du taux de foyers paysans isolés, deux objectifs majeurs dans l'évaluation de SimFeodal. L'encadré 6.2 illustre une démarche d'exploration plus poussée de ce paramètre.

Encadré 6.2 : Un scénario thématique pour tester l'hypothèse de croissance démographique

L'envie de mener des « scénarios thématiques » a émergé très tôt dans la conception du modèle SimFeodal. L'idée était de pouvoir tester des hypothèses différentes quant aux grands faits stylisés mobilisés dans le modèle. Ces versions alternatives permettraient d'éprouver la validité du modèle, et donc des logiques sur lequel il repose, en l'adaptant à d'autres régions où les processus étudiés se sont déroulés différemment voire pas du tout.

À ce jour, une quinzaine de scénarios de tels types ont été conçus, implantés et simulés. La temporalité plus large de ce projet de recherche par rapport à celle de ce travail de thèse fait que l'analyse des résultats de ces scénarios et des résultats thématiques qu'ils engendrent est encore en cours par l'ensemble de l'équipe de SimFeodal.

Dans cet encadré, nous présentons toutefois un scénario, qui permet de revenir sur un élément majeur du modèle tel qu'il a été conçu. Cet élément est l'absence de prise en compte de croissance démographique, quand bien même empiriquement, on sait qu'il y a eu une croissance. Pour tester les effets d'une telle croissance sur les sorties du modèle, on a procédé presque toute chose par ailleurs : la quasi-totalité des paramètres n'ont pas été modifiés, et le modèle n'a donc pas été re-calibré pour être adapté à ce fait stylisé, nouveau et majeur, qui a été implémenté. Seule

exception : pour que l'état final du scénario soit comparable à l'état final de la version calibrée, il fallait que les populations soient comparables. De même que l'on a fait varier le taux de croissance démographique, on a donc aussi fait varier la population initiale du modèle, afin que la population atteigne 40 000 foyers paysans en fin de simulation.

Il y a eu trois scénarios conçus pour éprouver l'influence de taux variables de croissance démographique (D1, D2 et D3). On n'en présente ici qu'un seul, par soucis de brièveté. Ce scénario, intitulé « D2 », est celui dont les résultats sont les plus intéressants. Dans ce scénario, le taux de croissance démographique est fixé à 12.89%, ce qui permet de faire passer une population initiale de 4 000 foyers paysans à 40 000 en fin de simulation. Cela correspond donc à un décuplement de la population entre 800 et 1200, jugé non aberrant par les thématiciens.

Indicateur	Valeur attendue	Valeur de référence	Moyenne	Médiane
Agrégats	200	249	198	199
Gros châteaux	10	15	12	12
Églises paroissiales	300	348	252	253
Distance moyenne entre églises	3 000 m	1 459 m	1 988 m	1 975 m
Part de foyers paysans isolés	20 %	30 %	21 %	21 %
Augmentation de la charge fiscale des foyers paysans	x 3	x 2.4	x 2.6	x 2.6

TABLEAU 6.4 – Valeurs des indicateurs numériques du scénario D2 en fin de simulation. *Les valeurs de référence correspondent aux moyennes obtenues dans la version calibrée de SimFeodal, sans croissance démographique donc.*

Les résultats agrégés de ce scénario (tableau 6.4) sont globalement satisfaisants, et même plus que les résultats de la version calibrée : le nombre d'agrégats en fin de simulation et la part de foyers paysans isolés sont presque parfaitement ajustés aux valeurs attendues fixées empiriquement. Le nombre de grands châteaux et l'augmentation de la charge fiscale sont aussi plus proches des attentes, bien que d'une manière moins franche. Seul point négatif : les églises paroissiales sont beaucoup moins nombreuses dans ce scénario que dans la version de référence, et trop faibles désormais au regard des valeurs attendues.

En regardant le détail de la structure, et notamment relative aux indicateurs de sortie relatifs aux agrégats (figure 6.25), on constate qu'en matière de hiérarchisation du système, les résultats de ce scénario sont aussi meilleurs que ceux de la version de base (figures 6.5 et 6.8). La croissance du nombre d'agrégats y est assez régulière, contrairement à la version calibrée (figure 6.5) où l'évolution était très faible jusqu'en

1060. Plutôt que d'insuffler un changement de tendance, les mécanismes exogènes (960 et 1060) ne font qu'accélérer un processus déjà actif. On note aussi que l'organisation hiérarchique des agrégats, et son évolution, est bien plus proche des formes connues sur les sociétés contemporaines. Dans la version calibrée du modèle (figure 6.8), la courbe conservait un « coude » important, tandis qu'ici, on note que l'évolution tend vers un redressement de la pente de la courbe rang-taille. En cela, l'organisation hiérarchique tend vers le modèle log-normal observé empiriquement sur de très nombreux systèmes (CURA et al. (2017a) par exemple).

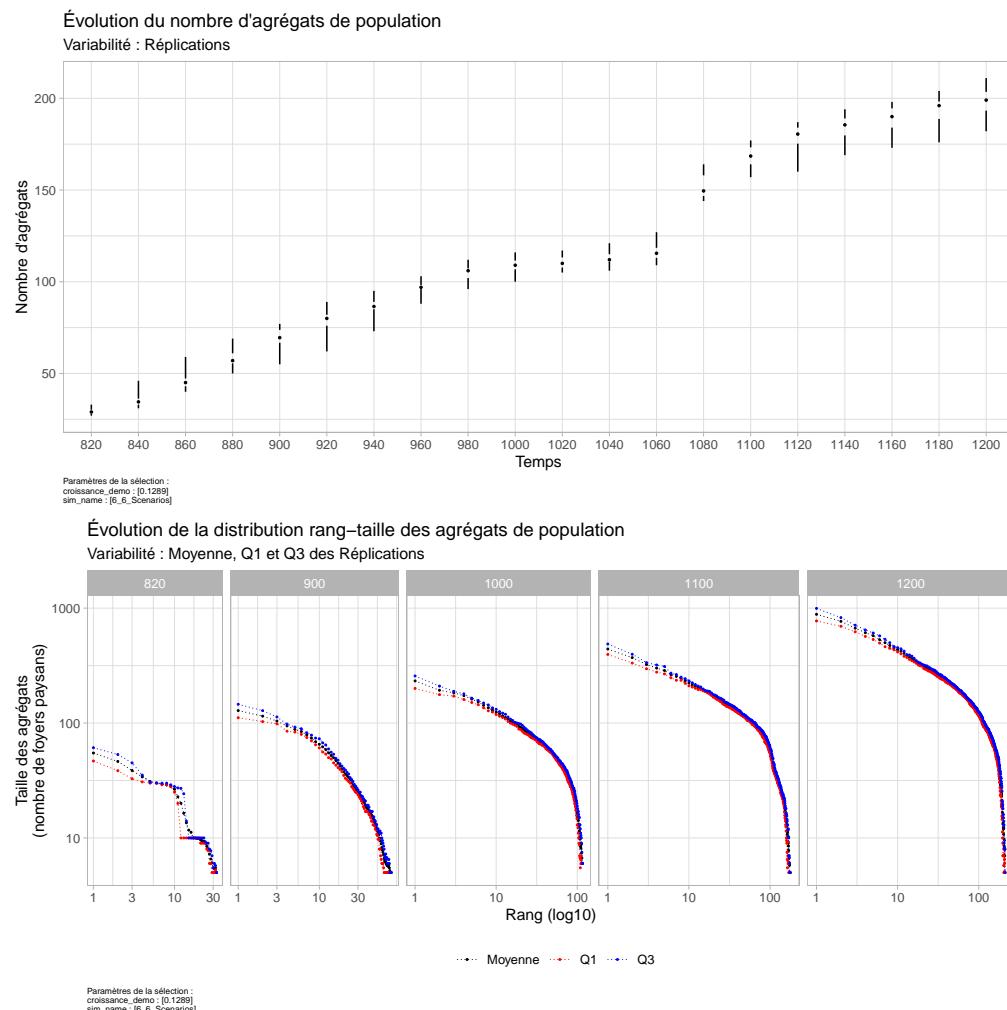


FIGURE 6.25 – Nombre et organisation des agrégats dans le scénario D2.
 Nous ne détaillerons pas les autres résultats de ce scénario D2, par ailleurs d'ores et déjà explorable dans la plateforme SimEDB ([mettre lien direct](#)), et nous contenterons d'affirmer que ce scénario répond mieux une majorité des attentes identifiées pour SimFeodal. C'est particulièrement étonnant dans la mesure où le modèle n'a jamais été conçu en ayant l'arrière pensé d'y remplacer la stabilité démographique par de la croissance, et n'a pas non plus été calibré à cet effet. Sans perdre de vue les biais que l'implémentation informatique de mécanismes peut apporter vis-à-vis des processus modélisés, on notera tout de même qu'il est, thématiquement et méthodologiquement, très intéressant que les interactions entre mécanismes de SimFeodal s'ajustent mieux quand de la croissance démographique est mise en place. Cela nous semble constituer un

résultat majeur de ce scénario, et de SimFeodal plus globalement : sans mettre en place de mécanisme de croissance démographique, les objectifs thématiques à atteindre semblent inaccessibles, alors qu'une version même naïve et non calibrée d'un tel mécanisme permet déjà de répondre bien davantage aux objectifs formalisés.

Agrégats de population. Les deux paramètres agissant sur la définition des agrégats (paramètres `distance_detection_agregat` et `nb_min_fp_agregat`) sont très comparables et agissent de manière symétriquement opposée sur les indicateurs de sortie (figure 6.26).

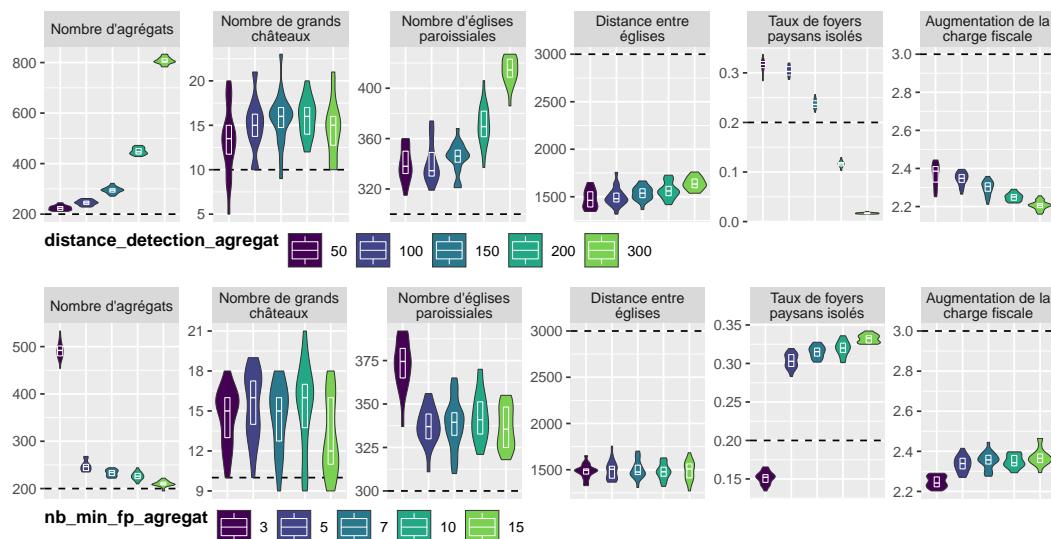


FIGURE 6.26 – Sensibilité des paramètres liés aux agrégats.

Sans surprise, leur effet est largement circonscrit aux indicateurs relatifs aux foyers paysans (à l'exception inattendue des églises paroissiales, sans doute pour les mêmes raisons que le paramètre de taille du monde simulé), mais il est intéressant de noter leur extrême sensibilité.

On constate ainsi que des variations relativement fines de ces paramètres¹⁷ aboutissent sur des variations plus que linéaires, et d'ordres de grandeurs quasi-différents sur le nombre d'agrégats (800 au maximum sur le premier paramètre, contre 200 au minimum) et le taux de foyers isolés (de plus de 30% à moins de 2% sur le même paramètre).

Les variations présentées dans la figure indique que les valeurs par défaut (100 m et 5 foyers paysans) sont au moins dans des intervalles assez sensés au regard des objectifs poursuivis. Cela nous indique qu'il serait possible de jouer plus finement sur les valeurs de ces paramètres pour améliorer le calibrage de SimFeodal.

17. Des distances de quelques dizaines/centaines de mètres de plus ou moins au regard des 80 kilomètres de côté du monde simulé pour le premier paramètre; quelques foyers paysans de plus ou de moins pour constituer un agrégat dans le second paramètre, relativement aux 40 000 foyers paysans que compte le modèle...

6.2.3.3 Paramètres liés aux seigneurs et châteaux

Les paramètres liés aux seigneurs et aux châteaux (les premiers construisant les seconds) sont les plus nombreux du modèle et il est attendu qu'ils soient assez sensibles. Ce sont en effet les paramètres qui régissent les mécanismes qui façonnent le monde dans lequel les foyers paysans auront à évoluer.

Seigneurs. La figure 6.27 présente les quatre paramètres sélectionnés liés aux seigneurs et aux châteaux : droits_fonciers_zp, proba_gain_haute_justice_gs, taux_prelevement_zp_chateau et proba_creation_zp_autres_droits_ps.

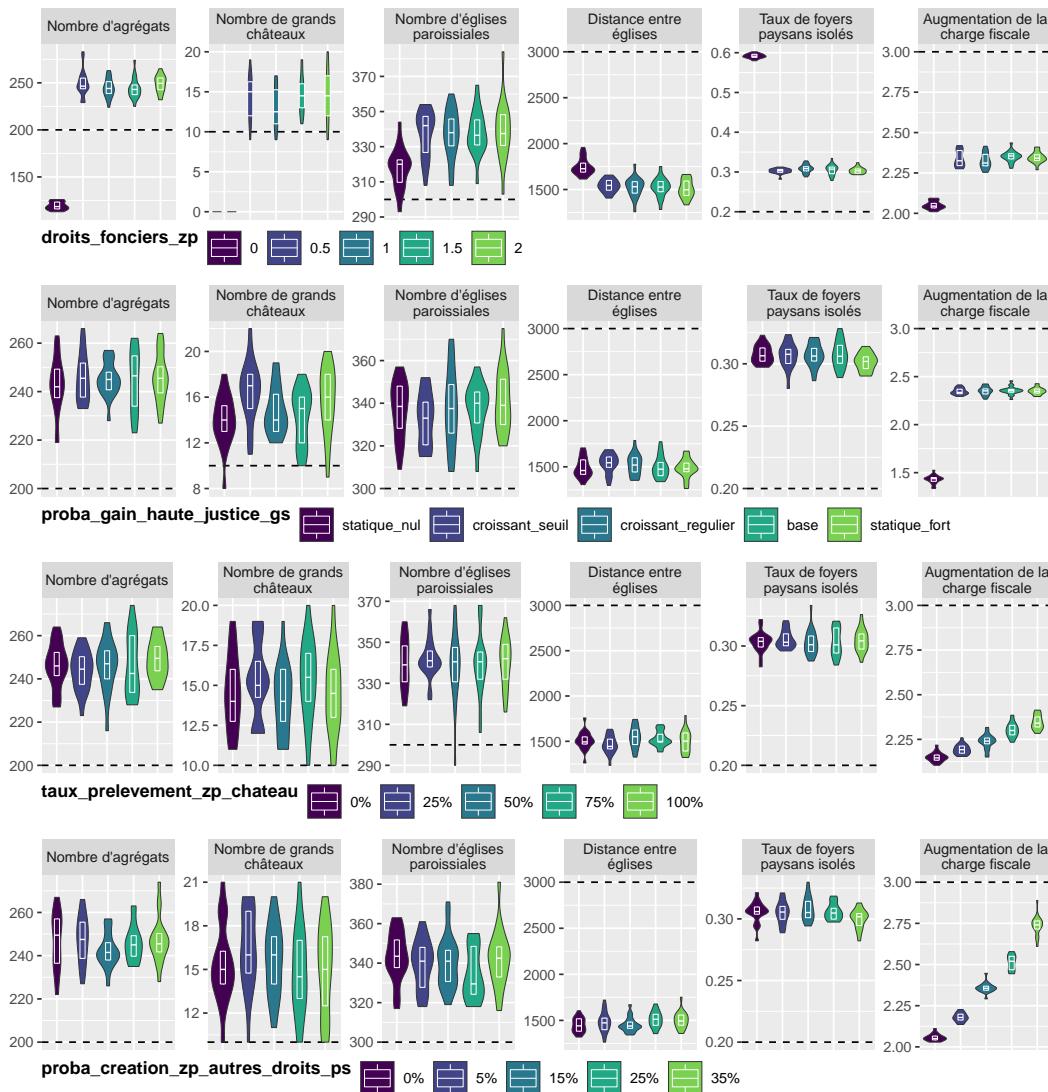


FIGURE 6.27 – Sensibilité des paramètres liés aux seigneurs.

À la lecture de cette figure, on note en premier lieu que de nombreux indicateurs montrent des « violons » très étendus, signes d'une forte variabilité relative à l'aléa, et donc d'une faible variabilité absolue aux valeurs testées. Sur ces indicateurs (les trois premiers indicateurs des trois derniers paramètres par exemple), l'influence des paramètres est presque nulle. Au contraire, ces quatre paramètres influent sur le dernier indicateur (augmentation de la charge fiscale), via un effet visuel linéaire (deux derniers paramètres) ou de seuil (deux premiers).

On retrouve cet effet de seuil sur plusieurs indicateurs chez le premier

paramètre, qui régit le montant des redevances de loyer que les seigneurs perçoivent : la première modalité (0) joue de manière importante sur le nombre d'agrégats et de grands châteaux et sur le taux de foyers paysans isolés et la charge fiscale. Il est important de noter que cette modalité est particulière : quand sa valeur vaut 0, cela signifie que les seigneurs ne gagnent pas de puissance sur les loyers qu'ils prélèvent. Cela correspond donc à la désactivation du mécanisme associé, et il est intéressant de remarquer que les quatre paramètres ici présentés comportent tous une modalité qui désactive le mécanisme associé.

Sur les deux premiers paramètres, l'effet de rupture est net, par exemple sur l'augmentation de la charge fiscale. Le montant des droits fonciers (1er paramètre) collectés ne joue que par son activation ou non (les valeurs supérieures à 0 présentent des résultats très similaires). L'existence et la propension des droits de haute justice des grands seigneurs (2ème paramètre) ne semble jouer que sur l'augmentation de la charge fiscale, mais y exerce une influence énorme : c'est le seul des paramètres ici présentés dont une valeur testée peut faire diminuer autant cet indicateur (1.5 alors que l'ordre de grandeur des simulations est plutôt entre 2 et 2.5)

Il est intéressant de remarquer que pour les deux paramètres suivant¹⁸, où la valeur de 0% correspond aussi à une désactivation du mécanisme concerné, on ne retrouve pas ces effets de seuil. Ces paramètres ont une réaction linéaire, dans l'étendue testée, sur l'augmentation de la charge fiscale et n'ont que peu d'influence sur les autres indicateurs.

Le profil du dernier paramètre illustre les gains que l'analyse de sensibilité peut apporter pour le calibrage du modèle : ce paramètre agit sur l'augmentation de la charge fiscale dans des propensions non négligeables, et pas ou très peu sur les autres indicateurs (sa sensibilité globale le place en 36ème position sur les 57 paramètres). Ce paramètre constitue dès lors un très bon candidat à un ajustement de l'augmentation de la charge fiscale (y compris en éprouvant des valeurs de paramètre plus élevées que celles testées ici), puisqu'il agit dessus sans présenter d'effets de bords qui viendraient perturber d'autres indicateurs.

Châteaux. Les paramètres liés aux châteaux sont sensiblement surreprésentés parmi ceux qui ont la sensibilité la plus forte : il n'y en a que 6 sur les 57 paramètres (environ 11%), mais les trois paramètres sélectionnés (`debut_construction_chateaux`, `nb_tirages_chateaux_ps` et `periode_promotion_chateaux`) représentent 20% des paramètres les plus sensibles.

18. `taux_prelevement_zp_chateau` et `proba_creation_zp_autres_droits_ps`.

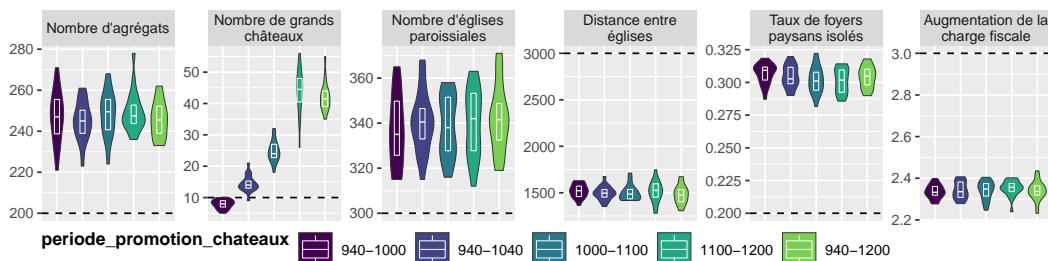


FIGURE 6.28 – Sensibilité du paramètre periode_promotion_chateaux.

Logiquement, on s'attend à ce que ces paramètres agissent majoritairement sur le seul indicateur numérique lié aux châteaux, ici le nombre de grands châteaux. C'est bien le cas du paramètre régissant l'intervalle de temps pendant lequel les châteaux peuvent être promus en gros châteaux (figure 6.28). Ce paramètre semble n'avoir aucun impact sur les autres indicateurs de sortie, mais influence fortement le nombre de gros châteaux. Sa valeur par défaut (de 940 à 1040, issue de connaissances expertes) est presque optimale au regard de cet indicateur, signe que le calibrage des autres paramètres (moins inscrits dans l'empirie) est adapté.

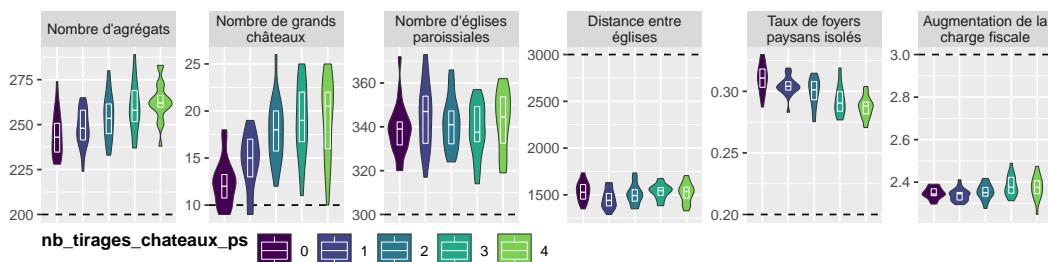


FIGURE 6.29 – Sensibilité du paramètre nb_tirages_chateaux_ps.

Les deux autres paramètres liés aux châteaux (figures 6.29 et 6.30) ont une influence qui n'est pas circonscrit au nombre de grands châteaux : tous deux agissent sur d'autres indicateurs que celui-ci.

Plus le nombre de tirages probabilistes permettant aux petits seigneurs de construire un château est élevé, plus il y a de grands châteaux en fin de période (figure 6.29), ce qui est attendu au regard des mécanismes. Par contre, on notera aussi que le nombre de ces châteaux influe sur le nombre d'agrégats et par conséquent sur le taux de foyers paysans isolés : plus il y a de châteaux, plus il y a de pôles et donc d'agrégats. Et plus il y a d'agrégats dispersés dans le monde simulé (les châteaux le sont nécessairement puisqu'ils ne peuvent être construits à moins de 5 km les uns des autres), plus les foyers paysans isolés trouvent à migrer localement, diminuant donc la part de ceux qui demeurent isolés en fin de simulation. Cette influence reste assez modeste toutefois au regard des variations engendrées par le troisième paramètre de cette sélection.

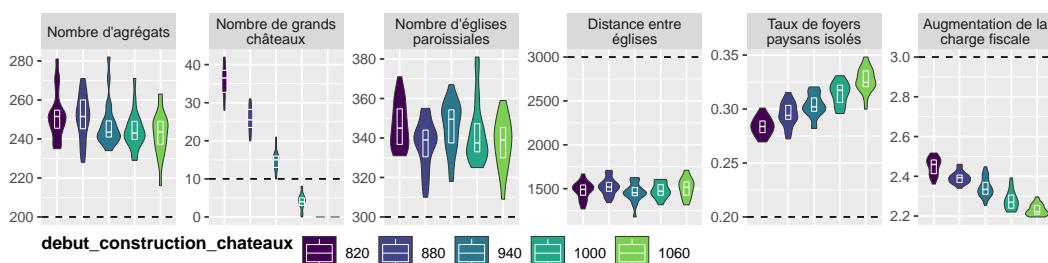


FIGURE 6.30 – Sensibilité du paramètre debut_construction_chateaux.

Celui-ci (figure 6.30) agit de manière assez similaire en termes de tendance, avec une influence plus importante toutefois. Les figures peuvent laisser penser à une relation inverse à celle du paramètre précédent, mais c'est uniquement dû aux valeurs de ce paramètre qui fixe l'année à partir de laquelle des châteaux peuvent être construits : plus cette année est tardive, moins le nombre de châteaux final sera important¹⁹. Au-delà des remarques précédentes, on notera que la date de construction des premiers châteaux influe sur l'augmentation de la charge fiscale, dans un sens qui nous semble à nouveau intuitif : plus il y a de châteaux, plus il y a de zones de prélèvement associées, et plus les foyers paysans voient leur charge fiscale augmenter.

De manière générale, la conception et le paramétrage des mécanismes liés aux châteaux ont demandé un travail conséquent (voir la partie dédiée à leur calibrage – section 6.1.1 – p. 257), qui nous a pourtant semblé, lors ces étapes, assez peu convaincant au regard de l'amélioration très modeste que cela a apporté en termes d'ajustement général du modèle. D'où de nombreux débats internes entre modélisateurs et thématiciens sur la nécessité de détailler autant les mécanismes liés à la construction des châteaux.

L'analyse du premier paramètre (`periode_promotion_chateaux`, figure 6.28) semble aller dans ce sens, puisque la complexité des mécanismes de promotion des châteaux ne semble influencer, sur ces indicateurs très synthétiques, que l'indicateur directement lié : le nombre de gros châteaux.

Les résultats l'analyse de sensibilité des autres paramètres (figures 6.29 et 6.30) donnent tort à l'intuition du modélisateur-« calibreur », et gain de cause aux thématiciens pour lesquels les châteaux, et la justesse de leur implémentation, avaient une dimension thématique considérable. La portée réduite mais claire de ces paramètres sur le premier objectif thématique recherché (la concentration des foyers paysans) justifie de leur existence et de leur nécessité dans les processus modélisés au sein de SimFeodal.

6.2.3.4 Paramètres liés aux églises et paroisses

Le dernier paramètre de cette analyse visuelle est aussi le seul qui porte sur les paroisses. Celles-ci constituent l'un des moteurs principaux de la fixation de la population dans les agrégats de taille réduite qui constituent la grande majorité des lieux de concentration des foyers paysans (la fameuse « longue traîne » de cette hiérarchie). En première analyse, cette sous-représentation des paramètres liés aux paroisses dans l'ensemble des paramètres sélectionnés nous apparaît donc contre-intuitif.

19. Au contraire du paramètre précédent, où une modalité plus forte impliquait plus de châteaux.

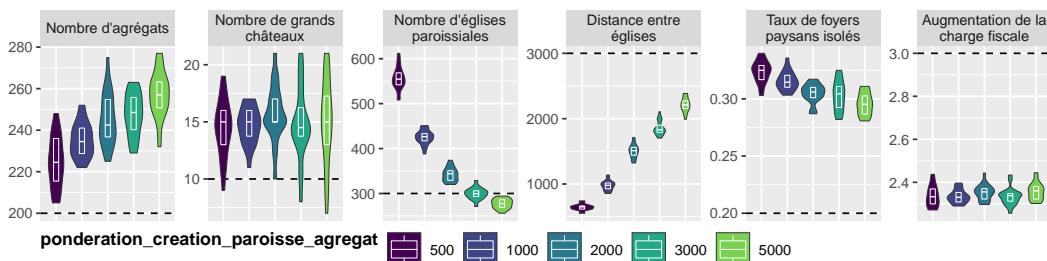


FIGURE 6.31 – Sensibilité du paramètre de pondération de création de nouvelles paroisses dans les agrégats.

La figure 6.31 présente les réponses des indicateurs à différentes valeurs du paramètre ponderation_creation_paroisse_agregat, qui agit sur le nombre de foyers paysans nécessaires à la création d'une nouvelle église paroissiale au sein des agrégats. De manière prévisible et évidente, ce paramètre influence nettement les deux indicateurs liés aux paroisses et églises : plus grand est le nombre de paroissiens nécessaire à la création d'une nouvelle paroisse dans un agrégat, plus faible est le nombre d'églises paroissiales conséquemment créées. Et moins il y a d'églises dans un monde à la superficie constante, plus grande est la distance entre elles.

Passé ces éléments intuitifs, on notera avec intérêt la variation amenée par ce paramètre sur le nombre d'agrégats : plus le seuil est élevé, plus les agrégats sont nombreux, et cette corrélation apparaît visuellement significative et inverse à celle du nombre d'églises paroissiales. Cette tendance est inverse à celles observées dans les paramètres liés aux foyers paysans et agrégats (section 6.2.3.2, figures 6.22 à 6.24 et 6.26). Pour ces paramètres, les nombres d'agrégats et d'églises paroissiales varient dans le même sens face à une augmentation de la valeur des paramètres. Dans le cas du paramètre de pondération de la création de paroisses « urbaines », la relation est inverse (figure 6.31).

Cela nous paraît contre-intuitif au regard des mécanismes du modèle, et résulte vraisemblablement d'effets inattendus des interactions entre ces mécanismes. Une piste d'explication réside dans l'influence de ce paramètre de pondération des créations de paroisse sur la hiérarchisation des paroisses et des pôles. En créant moins de paroisses en zone dense, la distribution de l'attractivité des pôles d'attraction – qui dépend en large partie du nombre d'églises paroissiales qui les composent – tend vers plus d'uniformité. Quand les pôles ont une attractivité plus homogène, les migrations locales sont favorisées, et la concentration s'effectue alors vers des pôles moins attractifs constitués d'agré-gats faiblement peuplés.

6.2.4 Analyser la sensibilité à l'aléa

En menant l'analyse de sensibilité visuelle, on a pu remarquer que certains indicateurs présentaient une plus forte variation que d'autres. Une partie de l'explication tient à l'inégale amplitude des valeurs de paramètres testées, mais d'autres facteurs peuvent être en jeu.

De manière globale, on constate dans les résultats de la version calibrée de SimFeodal (tableau 6.1) que la variabilité des indicateurs émergents, mesurée

à partir de leur écart-type, est forte. L'écart-type se lisant dans l'unité de l'indicateur, il peut être intéressant de le transformer en coefficient de variation ($CV_{\text{indicateur}} = \sigma_{\text{indicateur}} / \mu_{\text{indicateur}}$) pour obtenir des valeurs comparables entre les indicateurs.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation
Agrégats	249	10.45	0.042
Grands châteaux	15	2.87	0.191
Églises paroissiales	348	12.96	0.037
Distance moyenne entre églises	1459 m	97 m	0.066
Part de foyers paysans isolés	30%	0.8 %	0.027
Augmentation de la charge fiscale des foyers paysans	$\times 2.4$	0.030	0.013
Moyenne			0.063

TABLEAU 6.5 – Mesures de dispersion des indicateurs de sortie de la version calibrée (6.6) de SimFeodal.

La comparaison des coefficients de variation tableau 6.5 montre que la variabilité des indicateurs due à l'aléa est assez faible, et d'ordre de grandeurs comparables d'un indicateur à l'autre²⁰.

Pourtant, lors de l'analyse de sensibilité, on a pu constater des variations (étendue dans l'axe des ordonnées des *violin-plots*) bien différentes au sein des réplications des paramètres testés. Dans la figure 6.23 par exemple, on peut remarquer que la modalité « dynamique_large » présente une variabilité à l'aléa (le « violon » est très étendu) différente des autres modalités : plus faible sur le nombre d'églises paroissiales et plus importante sur l'augmentation de la charge fiscale. De même, l'indicateur ponderation_creation_paroisse_agregat (figure 6.31) présentait, sur le nombre de grands châteaux, une importante différence de variabilité à l'aléa.

Il nous paraît par conséquent utile de mener un bref complément d'analyse, dédié à l'étude de la variabilité au sein des réplications d'une expérience. De telles analyses systématiques nous paraissent peu fréquentes dans la littérature liée aux modèles de simulation en géographie. On trouve une définition de ce type d'approche chez GINOT et MONOD (2005), sous le terme d'« analyses d'incertitude » :

« Compte tenu des incertitudes sur les paramètres, de la variabilité naturelle des variables d'entrée et des composantes stochastiques qui peuvent être incluses dans la structure du modèle, il s'agit de calculer l'incertitude associée aux variables de sorties. Les analyses d'incertitude sont très liées aux analyses de sensibilité dans la

20. Le nombre de grands châteaux fait exception : son coefficient de variation (0.191) est nettement supérieur aux autres. Cela s'explique par l'ordre de grandeur du nombre de châteaux et grands châteaux, faible relativement aux autres, et où des variations de quelques unités jouent beaucoup sur l'écart-type en raison de la nature entière de ces variables.

mesure où l'on souhaite en général connaître non seulement cette incertitude, mais également son origine. C'est pourquoi ces deux types d'analyses sont souvent menées en parallèle, voire confondues. »

GINOT et MONOD 2005, p. 76

Pour mesurer cette incertitude, nous avons repris l'ensemble des réplications correspondant à l'analyse de sensibilité de chaque paramètre et avons mesuré la variabilité (écart-type) sur chaque indicateur. Afin d'avoir des mesures comparables, on a ensuite procédé à une réduction (division par l'écart-type des valeurs de référence, présentées dans le tableau 6.5) de l'amplitude de ces valeurs.

Distribution de la sensibilité à l'aléa

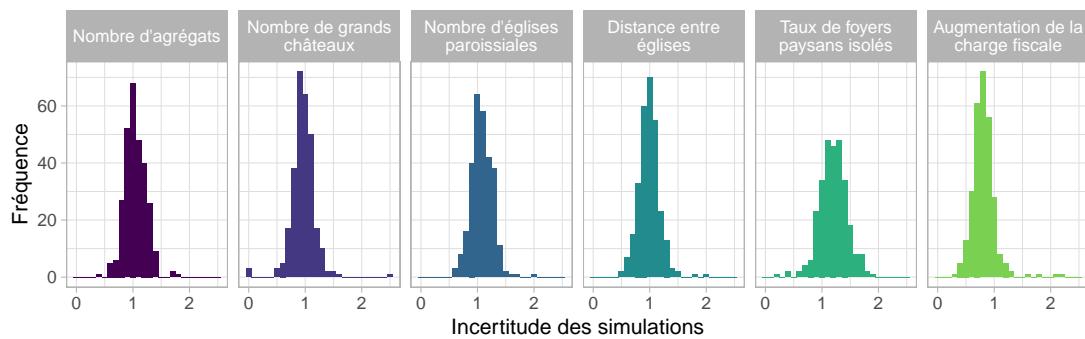


FIGURE 6.32 – Sensibilité à l'aléa selon les indicateurs.

L'incertitude mesurée se lit en proportion de l'écart-type des résultats de la version calibrée de SimFeodal. Une valeur de 0.5, par exemple, signifie que la variabilité due à l'aléa est moitié moins importante que celle des valeurs de paramètres issues du calibrage.

La distribution de ces valeurs d'incertitude relatives est présenté dans la figure 6.32. Dans ces histogrammes, la valeur de 1 correspond à une incertitude moyenne identique à celle des réplications de référence, c'est-à-dire des réplications de la version calibrée du modèle dont les résultats ont été commentés dans la première partie de ce chapitre (section 6.1.2). Une valeur de 2 peut être comprise ainsi : pour l'indicateur considéré, les différentes simulations exécutées lors de l'analyse de chaque valeur de chaque paramètre ont une variabilité deux fois supérieure à la variabilité de référence. Autrement dit, certaines valeurs de certains paramètres amènent une bien plus forte variabilité : ils laissent une part plus importante à la stochasticité du modèle.

On peut remarquer que la plupart des indicateurs présentent des *outliers*, c'est-à-dire des valeurs de paramètres pour lesquelles la variabilité due à l'aléa est nettement supérieure (ou inférieure) à la normale. Dans le cas du nombre de grands châteaux, il y a même des valeurs de paramètres qui montre une absence presque totale de variabilité à l'aléa. Sans aller plus loin sur cet exemple, il s'agit en fait des valeurs de paramètre qui ont tendance à réduire très largement le nombre de châteaux, amenant alors à une variabilité extrêmement faible dans cette amplitude des possibles restreinte.

À partir de cet histogramme, nous avons isolés les *outliers* et en proposons une représentation graphique dans la figure 6.33.

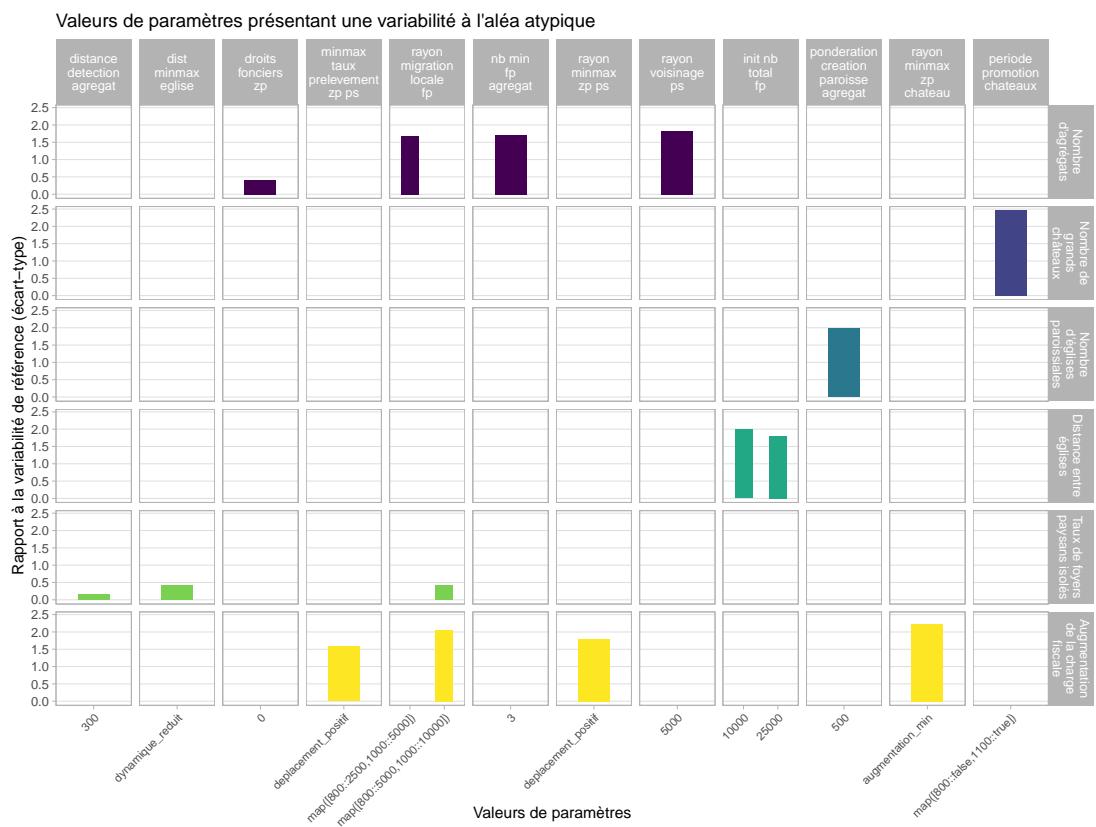


FIGURE 6.33 – Paramètres présentant des sensibilités atypiques à l'aléa.

De manière globale, on peut remarquer que les indicateurs relatifs aux foyers paysans sont surreprésentés parmi cette sélection d'*outliers*. Cela montre bien que les foyers paysans sont les agents qui subissent le plus les changements de valeurs des paramètres du modèle.

Notons aussi que sur les 14 *outliers* identifiés (axe des abscisses), la moitié sont des valeurs de paramètres qualitatifs. La difficile estimation de l'amplitude de ceux-ci explique sans doute en partie la plus forte variabilité à l'aléa : si on choisit des valeurs (étendues, évolutions temporelles etc.) trop éloignées des valeurs calibrées, il se peut que le modèle réagisse de manière non habituelle aux interactions entre mécanismes.

Plus spécifiquement, on peut constater le comportement très particulier du paramètre régissant le rayon maximum de migration locale des foyers paysans (*rayon_migration_locale_fp*, cinquième colonne en partant de la gauche dans la figure 6.33). Certaines valeurs de ce paramètre sont parmi les plus sensibles à l'aléa (notamment sur le nombre d'agrégats et l'augmentation de la charge fiscale : les barres y sont parmi les plus élevées de la figure). De plus, de manière surprenante, la valeur correspondant à un rayon évolutif très étendu (*map([800:5000, 1000:10000])*) se caractérise aussi par une très faible sensibilité à l'aléa sur l'indicateur de concentration des foyers paysans.

Ce paramètre a donc la capacité de faire fortement varier les sorties (vu dans l'analyse de sensibilité visuelle), mais en plus de faire varier tout aussi fortement la part de l'aléa dans le modèle, en la diminuant ou en l'augmentant.

6.2.5 Quels apports de l'analyse visuelle de sensibilité ?

Cette analyse de sensibilité, même limitée et grossière, a permis de mettre en évidence un certain nombre de propriétés des paramètres et d'apporter des connaissances extrêmement utiles sur le fonctionnement du modèle face à divers types d'aléas en particulier.

Dans un premier temps, notons que la hiérarchie de la sensibilité des paramètres n'est pas véritablement proche de celle que l'on attendait. Le paramétrage et le calibrage ont ainsi été menés, en partie, sur des paramètres moins déterminants que notre intuition du comportement du modèle ne pouvait le laisser croire. Cette étape d'évaluation qu'est l'analyse de sensibilité gagnerait à être menée avant le calibrage du modèle afin d'obtenir une meilleure adéquation aux objectifs. Ce raisonnement est toutefois circulaire : sur un modèle moins calibré, l'analyse de sensibilité n'aurait pas forcément mis en avant les mêmes paramètres. Comme ceux-ci sont en interaction étroite, les résultats de cette analyse de sensibilité sont ainsi, eux-mêmes, extrêmement sensibles au paramétrage de base.

Dans un second temps, l'analyse de sensibilité semble confirmer que le modèle est parcimonieux, relativement à son approche exploratoire du moins. On l'a dit lors de l'analyse quantitative, mais il nous semble important de le répéter tant ce résultat est rassurant au regard des craintes que l'on pouvait avoir : quand un modèle implique autant de mécanismes et paramètres, le risque est toujours important que certains soient entièrement redondants et donc superflus. Aucun des paramètres n'apparaît inutile, ce qui peut laisser entendre que les (très) nombreux mécanismes du modèle ne le sont pas non plus. Pour un modélisateur qui a des intuitions fortes sur les réactions d'un modèle aux différents changements de mécanismes et paramètres, c'est presque une surprise. Surprise d'autant plus positive que cet examen systématique des paramètres se révèle réellement une aide indéniable à la compréhension du modèle. Après plus de 5 ans à travailler régulièrement sur un modèle, il est très enrichissant d'y trouver encore des éléments inattendus voir nettement contre-intuitifs. De ce fait, l'analyse de sensibilité favorise elle aussi l'abduction (voir section 6.1.3).

Un autre point, classique, concerne les limites d'une telle analyse. Une approche entièrement quantitative, présentée dans l'introduction de cette partie, permet de s'affranchir des effets de faible comparabilité que l'on a pu constater dans l'analyse visuelle : certains paramètres ont une sensibilité globale importante, mais celle-ci se cantonne parfois à un unique indicateur, sans avoir de répercussions sur le reste du modèle. Un modèle comme SimFeodal, c'est-à-dire descriptif, exploratoire, est caractérisé par des paramètres nombreux, hétérogènes et parfois très qualitatifs. Il ne serait pas pertinent de chercher à quantifier, juste pour mener une analyse de sensibilité, tout ce qui n'a pas été quantifié dans le modèle en lui-même : objectivation des attendus dans les indicateurs graphiques, quantification de la pondération entre les différents objectifs etc.

La démarche mise en place pour cette analyse de sensibilité a été basée

sur une volonté d'exploration graphique et s'inscrit, comme de nombreux aspects de ce travail de thèse, dans une approche d'analyse visuelle entièrement dédiée à l'exploration d'un modèle. Cette démarche paraît confirmer l'adéquation de ce type d'approches à la construction et à l'évaluation commune et interdisciplinaire de modèles. Les éléments de compréhension des interactions effectives du modèle et les retours auxquels ces découvertes incitent nous paraissent entièrement fructueux, et à mettre au crédit de cette approche exploratoire, visuelle, et fondamentalement très qualitative.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les dernières étapes de calibrage de SimFeodal et les résultats qui en émanent. À l'aune de ces résultats, on peut conclure que le modèle, une fois calibré, est globalement satisfaisant, sur chacune des dimensions d'objectifs poursuivis : concentration et polarisation, hiérarchisation et fixation-dissémination du peuplement. L'ajustement n'est certes jamais parfait, mais aussi bien en termes de valeurs finalement obtenues que d'évolutions de ces valeurs au cours du paramétrage et du calibrage du modèle, cet ajustement nous apparaît tout à fait satisfaisant.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous partions du constat qu'il est difficile d'améliorer le calibrage du modèle à cause des effets d'interactions et des réponses inattendues de certains paramètres. Pour y remédier, nous avons mené une analyse de sensibilité de l'ensemble des paramètres de SimFeodal qui nous a permis de mieux comprendre l'influence de chaque paramètre et mécanisme lié sur les sorties du modèle. Cette analyse de sensibilité a aussi contribué à isoler certains paramètres qui constituaient des leviers sur lesquels agir pour améliorer le calibrage du modèle : des paramètres sans effets de bord, qui n'agissent véritablement que sur les indicateurs auxquels ils sont directement liés.

L'analyse de sensibilité a aussi débouché sur l'identification de paramètres ayant une influence plus importante que nous ne le pensions, voir une influence inverse, de manière contre-intuitive. Ces paramètres, entre autres, nous semblent de très bons candidats à la réalisation de scénarios thématiques (voir encadré 6.2) qui permettraient de comprendre les répercussions thématiques de ces résultats simulés surprenants.

Un élément limite pourtant fortement d'éventuelles améliorations et exploitations plus fines des résultats du modèle : le risque d'*overfitting*. Au vu de la précision faible et hétérogène des connaissances empiriques par le prisme desquelles SimFeodal est évalué, il paraît difficile de chercher à comparer de nouvelles versions du modèle dont les variations sur les indicateurs sont de plus en plus fines à mesure que le calibrage progresse.

Cela n'empêche aucunement le modèle d'être utile, utilisable et utilisé. Par faute de temps, nous n'avons présenté qu'un des scénarios sur la quinzaine réalisée, mais celui-ci apporte déjà beaucoup de matière à réflexion, autant d'un point de vue restreint au modèle que, plus généralement, sur les processus

thématiques que SimFeodal cherche à reproduire.

Dans l'ensemble, la calibration, l'analyse de sensibilité et les scénarios servent certes un rôle de validation interne, mais surtout, ils permettent aux co-concepteurs du modèle de mieux en comprendre les biais et le fonctionnement effectif, c'est-à-dire issu des indénombrables interactions entre mécanismes. Afin de saisir les effets contre-intuitifs liés à ces interactions, c'est-à-dire en cherchant à acquérir une connaissance plus intime du modèle, on effectue un travail dont les apports thématiques sont certains. Comme dans la conception d'un modèle, l'analyse de ses résultats et la recherche de leur amélioration force ainsi les modélisateurs à mieux formaliser et expliciter les hypothèses et attentes sous-jacentes. Dans le cadre d'un modèle dédié à l'étude de processus anciens sur le temps long, ces différentes phases ont aussi poussé à la recherche approfondie de nouvelles sources et documentations sur les faits stylisés et mécanismes implémentés dans le modèle. Toutes ces étapes, loin de viser à une validation théorique du modèle, sont ainsi autant d'occasions d'échanger et de co-construire des connaissances toujours plus formalisées. Il nous semble que c'est là l'enjeu majeur de cette expérience de construction collective et interdisciplinaire d'un modèle exploratoire.

7

Retours sur la co-construction et l'exploration d'un modèle en situation d'inter-disciplinarité

Version 2019-09-26

N.B. : Ce chapitre 7 correspond à l'ancien chapitre 8 + éléments du 7.

- 07/09/2019 : Reprise plan et insertion parties tirées du chapitre 6 du manuel de modélisation ISTE
- 12/09/2019 : ISTE beaucoup trop long : reprise du plan et on fera des références à ISTE

Sommaire

Introduction	251
6.1 Calibrage du modèle et premiers résultats	252
6.1.1 Calibrage du modèle	252
6.1.2 Résultats des simulations	261
6.1.3 Après le calibrage, comment affiner le modèle ?	274
6.2 Analyser la sensibilité de SimFeodal	277
6.2.1 Méthodologie - Analyse visuelle de sensibilité.	278
6.2.2 Sélection des paramètres à analyser.	288
6.2.3 Évaluation visuelle de la sensibilité	293
6.2.4 Analyser la sensibilité à l'aléa	304
6.2.5 Quels apports de l'analyse visuelle de sensibilité?	308
Conclusion	309

Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons décrit l'approche suivie pour la co-construction et l'évaluation du modèle SimFeodal. Il nous semble, en accord avec le positionnement exposé dans le chapitre 1, que cette démarche est porteuse quand effectuée de manière véritablement collective et interdisciplinaire, et, au moins dans le cas du groupe de travail constitué autour de SimFeodal, fructueuse. Dans le présent chapitre, nous revenons, de manière réflexive sur cette expérience de modélisation interdisciplinaire. Cela doit nous permettre d'en faire émerger les atouts, les difficultés, mais aussi d'y discerner les particularités, liées à ce modèle spécifique, vis-à-vis du cadre plus générique de la modélisation. La diversité des points de vue présentés dans cette thèse – conceptuel, théorique, méthodologique ou encore technique – nous paraissent ici devoir être mobilisés à nouveau au sein de ce retour global sur une expérience collective inscrite dans la longue durée.

On a plusieurs fois insisté, notamment dans les **chapitres 3 et 4**, sur le fait qu'il est difficile de séparer chronologiquement la construction et le paramétrage d'un modèle d'une part, et son évaluation et exploration d'autre part. Ces tâches s'inscrivent en effet dans une spirale d'allers-retours constants. La discréétisation de ce continuum est forcément artificielle, mais nécessaire pour le décrire de manière linéaire au sein d'une narration. Dans cette thèse, cette narration s'est exprimée chronologiquement, présentant d'abord le modèle, son évolution, puis la méthodologie mise en place pour l'évaluer et l'explorer, autour du cadre théorique des (geo)visual analytics.

Au sein de ce chapitre, nous inversons cet ordre, en présentant d'abord les retours liés à l'exploration visuelle des données de simulation, et seulement après cela les retours plus conceptuels sur le processus de co-construction interdisciplinaire d'un modèle. Cette inversion s'explique par la prépondérance que nous accordons à la visualisation des données dans le processus d'ensemble qu'est la construction d'un modèle. L'approche visuelle nous paraît être tout à la fois une interface disciplinaire efficace et une condition préalable indispensable à l'expérience de modélisation collective, qui plus est interdisciplinaire et caractérisée par une forte hétérogénéité de cultures scientifiques.

7.1 L'analyse exploratoire de données issues de simulation, une approche aux possibilités multiples

L'évaluation des données issues de SimFeodal a été inscrite dans plusieurs cadres méthodologiques : la visualisation de données (*InfoVis*), l'analyse exploratoire de données (*EDA*) et les (*geo*)*visual analytics* d'une part, mais aussi, d'autre part, la démarche de *face validation* et d'évaluation visuelle défendue dans les **chapitres 3 et 5**. Les premiers sont utilisables avec toutes les données numériques, y compris spatio-temporelles à l'instar des données de sortie de SimFeodal. Les seconds tiennent plus à la démarche de modélisation en tant que telle, quand bien même là aussi extensible à tout type de modélisation (simulation, mais aussi modélisation statistique, mathématique...) Il nous semble toutefois important, dans cette partie, de revenir sur le cas spécifique que constituent les données issues de simulation, et en particulier en ce que cela implique en matière de visualisation. Une fois ces spécificités isolées, on pourra apprêhender plus globalement le rôle et l'importance de la visualisation de données dans le cadre de la modélisation. Une dernière sous-partie explorera les pistes potentielles de dépassement de l'exploration visuelle des sorties de modèle, en cherchant à passer de l'exploration à la validation de modèles de simulation.

Cette partie s'appuie, en partie, sur un chapitre d'ouvrage à paraître (CURA 2020). Il est consacré au rôle et aux méthodes de la visualisation dans le domaine de la modélisation géographique. Moins synthétique que la présente partie, il peut y offrir un complément utile.

7.1.1 L'analyse exploratoire de données, un cadre théorique et méthodologique adapté à l'exploration de toutes données spatiales et spatio-temporelles

Le chapitre 5 et particulièrement la présentation de la démarche d'exploration visuelle des données issues de sortie de simulation pourrait tout à fait s'appliquer à des données plus classiques. La problématique des données hétérogènes, liées par un Modèle Conceptuel de Données adapté, explorées en multipliant les angles de vue, n'est ainsi pas propre aux données de simulation. Toutefois, sur plusieurs aspects, certains aspects de la simulation, et en particulier l'évolutivité des données et la dimension réplicative, contraignent l'exploration visuelle et forcent à abandonner certaines méthodes traditionnelles de représentation graphique. Dans cette sous-partie, nous revenons sur le positionnement des données issues de simulation dans le panorama des types d'ensembles de données.

Parallèles entre exploration de données et exploration de modèle
Avant tout, il nous semble utile de rappeler que l'exploration des données de sortie d'un modèle de simulation est une manière d'explorer le modèle de si-

mulation en lui-même (cf. chap 3, trouver section). Par explorer, on entend ici une recherche de compréhension des logiques de fonctionnement du modèle, c'est-à-dire des effets produits par les interactions complexes entre les agents et les mécanismes du modèle. L'exploration d'un modèle s'inscrit ainsi dans un parallèle très net avec l'analyse exploratoire de données (EDA). Les deux démarches sont ainsi largement identiques, et contiennent les mêmes étapes.

En premier lieu, exploration de données et exploration de modèles cherchent à repérer les structures globales présentes dans les données (et modèles). Dans le premier cas, il peut s'agir des tendances générales d'un jeu de données, d'analyses de corrélation, d'étudier les amplitudes, les évolutions temporelles etc. Pour les modèles, on cherche aussi d'abord à observer les grandes dynamiques produites par le modèle de simulation, la forme de leur évolution temporelle, les effets de rétro-action les plus visibles etc. Explorer le modèle, c'est ainsi, avant tout, comprendre les effets croisés des mécanismes sur la structure globale, agrégée, des entités modélisées.

Dans un second temps, l'exploration de données peut entrer dans des analyses plus fines, en cherchant par exemple à discerner des groupes d'unités aux comportements différents, des *outliers*, des variables aux relations inattendues... En sciences humaines et sociales, cette période de l'analyse est souvent l'occasion d'observer les résidus de modèles statistiques, afin d'entrer dans une caractérisation plus fine des particularités de certaines entités, spatiale ou non. La démarche est encore une fois la même dans l'exploration de modèles : après avoir dégagé les tendances générales, on peut changer d'échelle d'observation, en observant par exemple le comportement individuel de certains agents, ou en faisant varier plus finement certains paramètres pour en observer les influences sur le déroulé de la simulation. Là encore, la première phase d'étude, agrégée, intervient comme un filtre ou un modèle nul, dont on cherche ensuite à caractériser les écarts ou la composition désagrégée. Dans le chapitre précédent, l'analyse de sensibilité illustrait assez largement cette démarche. La première phase, de filtrage des paramètres, permettait de mettre en évidence notamment les co-variations habituelles des indicateurs de sortie selon les valeurs de paramètres mobilisées. La phase d'analyse visuelle, plus précise, étudiait plus avant le détail de ces variations, et permettait même de mettre en évidence des co-variations inverses à celles de la majorité des cas (retrouver exemple).

Les démarches d'analyse exploratoire de données et de l'exploration de modèles sont donc très similaires, appliquant les mêmes méthodes à des objets différents. Dans les deux cas, les éléments observés sont au final des données numériques multi-variées, qui constituent des proxy de phénomènes sociaux et/ou spatiaux dans le premier cas, et des proxy des dynamiques modélisées dans le cas des données de sortie de simulation.

Les données issues de simulation, des données spatio-temporelles « « intermédiaires » » En informatique, il est classique de différencier les types de bases de données selon la « taille » ou la masse de données contenues, c'est-à-dire selon le nombre d'entités/lignes représentées ou selon l'espace disque

effectivement occupé pour les stocker. Les données de faible taille et poids sont très classiques, et peuvent être traitées dans l'ensemble des solutions existantes, voire à la main pour les plus contenues (départements français par exemple). A l'opposé, les « big data » représentent des données qui ne peuvent ni être stockées ni être traitées sur un ordinateur personnel classique, et requièrent alors de faire appel à des technologies informatiques avancées. Le tableau 7.1 exemplifie l'éventail de données qui existent entre ces deux extrêmes.

Données			Stockage et analyse	
Quantité	Espace disque	Exemples	Type de stockage	Outils d'analyse
$\leq 1\ 000$ lignes	$\sim 1\ \text{Mo}$	Données de recensement agrégé	Fichiers textes	Tableurs, SIG...
1 000 - 100 000 lignes	$\sim 1\text{-}50\ \text{Mo}$	Recensement détaillé		
100 000 – quelques millions de lignes	$\sim 50\ \text{Mo} - 1\ \text{Go}$	Données individuelles, séries temporelles de capteurs multiples...	Tableur ou fichier binaire (Shapefile, geopackage...)	Outils statistiques interactifs (<i>GUI</i>) ou en lignes de commande (<i>CLI</i>)
10 à 100 millions de lignes	$\sim 1\text{-}10\ \text{Go}$	Jeux de données <i>opendata</i> récents : équipements, contenu généré par les utilisateurs (tweets), VGI...	Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD)	CLI (R/Python) via SQL, OLAP...
>100 millions de lignes	>10 Go	Données spatio-temporelle à résolution fine, collecte automatisée de capteurs, jeux de données des grosses entreprises du numérique...	SGBD distribués	Calcul intensif (<i>High-Performance Computing</i>)

TABLEAU 7.1 – Caractérisation des données intermédiaires dans le spectre des données.
Adapté de CURA (2019)

Dans la ligne grise, les données sont trop massives pour être traitées de manière classique, mais demeurent contenues dans des volumes informatiques que l'on peut est souvent amenés à manipuler (fichiers de films, logiciels...). Ce sont ces données que l'on peut nommer « données intermédiaires » : elles sont d'une taille largement praticable, mais constituent toutefois déjà des obstacles techniques difficiles à franchir sans faire appel à des méthodes d'archivage et d'analyse récentes.

Ce tableau peut facilement être comparé au tableau 5.X¹, où l'on montrait la massification des données issues de simulation au fur et à mesure de l'exploration d'un modèle. Les données issues de simulation s'inscrivent tout à fait dans les mêmes problématiques que ces « données intermédiaires ». Les données issues de simulations ne sont pas des *big data*, car elles ne sont ni véloques, variables ou imprévisibles, mais leur masse requiert tout de même des outils

1. Corriger référence dans chapitre 5, quand le tableau issu du manuel de modélisation aura été mis à jour.

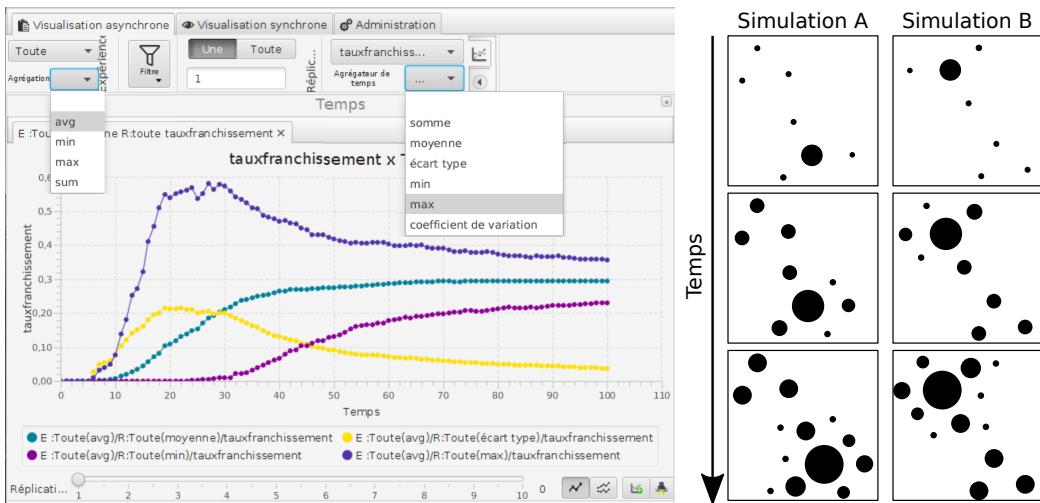
adaptés, tant pour leur archivage que pour leur interrogation. Les solutions mises en place pour leur analyse ([chapitre 5](#)) sont d'ailleurs précisément des solutions pensées pour ces données intermédiaires, où les infrastructures de type « bases de données analytiques » se distinguent.

Quelles spécificités des données de simulation ? La similitude d'ensemble entre ces données intermédiaires et les données issues de simulation ne doit pas pour autant masquer les caractéristiques propres des données issues de simulation, lesquelles complexifient leur analyse et requièrent le développement ou au moins l'usage d'outils particuliers, tel qu'illustré dans le [chapitre 5](#).

Contrairement aux big data, les données issues de simulation ne sont par essence ni incomplètes ni hétérogènes, puisqu'elles sont générées directement par le modélisateur. Toutefois, dans le cas d'un modèle conçu et développé dans la durée, les problématiques y sont assimilables : le modèle évolue, et les données qu'il est en mesure de générer évoluent donc en même temps. En dépit d'un contrôle complet sur la chaîne de production de données, les données issues de simulation peuvent ainsi poser des problèmes d'hétérogénéité, tel qu'illustré dans la section [5.N](#).

Une autre spécificité, cette fois-ci due à la nature des modèles de simulation plus qu'à leur usage, tient à leur essence stochastique. La dimension réplicative des données issues de simulation requiert alors une agrégation systématique, tant pour la mesure d'indicateurs synthétiques que pour la visualisation d'indicateurs graphiques. Pour les données temporelles, on peut utiliser des représentations graphiques de dispersion, tels que les *boxplots* largement employés dans ce travail.

Pour les données spatiales, des typologies des opérations d'agrégations spatio-temporelles existent (BACH et al. 2014), mais leur mise en place est peu aisée, et tend à s'appliquer à des outils *ad-hoc* plus qu'à des modèles génériques. Le logiciel VisuAgent (CURA et al. 2014) (figure 7.1a) constitue un exemple d'une telle plate-forme, très liée aux données du modèle de colonisation d'un espace vide « H.U.M.E. » (COUPÉ et al. 2018) dont elle cherchait à faciliter l'exploration. L'ambition de la plateforme décrite (VisuAgent) était ainsi de focaliser l'exploration sur la diversité des méthodes d'agrégation et des types de rendu plus que sur la construction d'indicateurs habituels d'évolution (spatio-)temporels.



(A) Visualisation de différentes méthodes d'agrégations, sur les dimensions réplicatives et temporelles, avec le logiciel VisuAgent.

(B) Deux cas théoriques d'évolution spatio-temporelle très similaires mais non agrégables.

FIGURE 7.1 – Obstacles à l'agrégation de données pour la visualisation. Exemples tirés de CURA (2020)

Dans le cadre de données de simulation, qui plus est quand l'espace est continu², on ne peut réaliser d'agrégations des données sur la dimension spatiale que quand celle-ci est stable. Dans un modèle comme SimFeodal, où l'espace est théorique, l'agrégation n'est pas possible car la répartition spatiale des agrégats, châteaux et églises change à chaque simulation. La figure 7.1b illustre ce problème en présentant deux sorties de simulation théoriques, très proches en termes d'évolution, d'espacement, de structure globale, mais dont on ne peut tirer une représentation agrégée. Pour le modélisateur, les deux alternatives sont donc ou bien de se contenter d'indicateurs numériques, agrégables, mais qui ne rendront pas correctement compte de la situation spatiale, ou bien de mener une observation de chacune des cartes correspondant aux différentes données produites par les réplications.

7.1.2 Construction de connaissance par l'exploration visuelle d'un modèle

Dans son Habilitation à Diriger des Recherches, Arnaud BANOS décrivait neufs « principes forts » de la modélisation (BANOS 2013, p. 76–84), dont le premier, « Modéliser c'est apprendre », était repris dans le titre de ce travail universitaire une fois publié (BANOS 2016). Dans CURA (2020, p. 0–N), nous menons une comparaison point à point de ces neufs principes en les appliquant à la visualisation de données issues de modèles. Nous reprenons ici quelques uns des arguments qui nous paraissent importants en termes de réflexivité, sur les potentiels gains de connaissances que l'exploration visuelle d'un modèle peut apporter.

2. Pour les données spatiales discrètes, par exemple quand l'espace prend la forme de cellules ou d'un maillage établi (régions, états...), on peut mettre en place des systèmes graphiques de représentation de la forme des distributions d'une variable. Voir RIBECCA (2018) par exemple.

La visualisation de modèle comme outil d'interdisciplinarité Les modélisateurs savent l'importance du dialogue dans la construction d'un modèle. Dans son principe 2, BANOS (2013, p. 77) l'explique ainsi : « Le modélisateur doit avoir conscience du caractère fondamentalement limité de ses compétences. Ce qui peut être perçu comme une faiblesse est pour moi une force. Assumée, cette réalité mène naturellement à la collaboration. De manière très générale, je dirais même que modéliser un système complexe est un acte par essence collaboratif ».

La visualisation est un outil de communication au service de la transmission et de la diffusion d'un message. Sans prise en compte de sa réception par ses lecteurs, le risque est important de concevoir un média peu compréhensible et donc peu utile. Les retours du public visé sont donc importants, d'autant plus quand la visualisation doit aider à appuyer ou à transmettre un message complexe, requérant une expertise thématique, comme c'est souvent le cas dans le cadre d'un projet de modélisation. Dès lors, le visualisateur ne peut agir seul, de la même manière que le modélisateur ne peut se contenter de sa seule expertise.

C'est d'autant plus vrai dans le cadre d'un modèle co-construit en interdisciplinarité. Les différences de culture scientifique s'expriment aussi en termes de « culture des données » (*data literacy*), c'est-à-dire par des habitudes et compétences hétérogènes en matière d'analyse et de visualisation de données. Explorer visuellement un modèle, c'est avant tout se mettre d'accord sur ce que l'on veut observer, et ensuite sur la manière de le représenter. Cette démarche, obligatoire, force à l'explicitation des détails techniques du modèle implémenté et de la manière précise dont les indicateurs de sortie sont obtenus, afin de minimiser le risque d'erreurs d'interprétation.

Par cette explicitation, ce dialogue, l'exploration visuelle d'un modèle force à la collaboration et, dans un cadre interdisciplinaire, à un réel partage de connaissances et de pratiques. Ce faisant, l'exploration visuelle d'un modèle participe largement au rôle d'interface disciplinaire que la modélisation, en tant que telle, suscite.

L'exploration visuelle comme modélisation Simulation et visualisation sont des domaines scientifiques étudiés par des communautés disciplinaires très différentes et assez largement hermétiques. Au sein même des réseaux francophones, les géographes se partagent par exemple entre différentes communautés. La communauté de la géographie théorique et quantitative (colloques ThéoQuant et ECTQG, réseau S4, liens avec les Instituts des Systèmes Complexes...) conçoit et développe des modèles depuis de nombreuses années, mais aussi des outils pour en explorer les sorties (voir TANNIER (2006) par exemple). D'un autre côté, la communauté géomatique (colloques SAGEO, GDR CASSINI/MAGIS...) s'intéresse notamment à l'exploration de données spatio-temporelles, à leur visualisation et modélisation, avec peut-être une entrée plus méthodologique que le premier ensemble. Ces deux communautés com-

muniquent peu, et cette situation n'est pas vraiment nouvelle³.

Pourtant, que l'on reprenne les définitions de ce que sont les modèles⁴, que l'on considère l'approche de modélisation graphique bien connue des géographes⁵, ou encore que l'on s'intéresse au rôle de la cartographie en géographie⁶, il est difficile de ne pas voir dans la représentation graphique une certaine forme de modélisation de phénomènes sociaux ou spatiaux. L'exploration visuelle, composée d'une succession de compositions graphiques que l'on raffine, transforme et dont on change le point de vue, est alors en tout point similaire au processus de construction d'un modèle de simulation (ANDRIENKO et al. 2018).

L'exploration visuelle n'est donc pas un processus isolé, particulier, mais peut alors s'inscrire dans les mêmes cadres théoriques et méthodologiques que la modélisation en tant que telle. L'évaluation des outils et types de représentation joue par exemple un rôle essentiel et de premier plan dans les enjeux actuels rencontrés par les communautés scientifiques des *visual analytics*, de l'interface homme-machine (IHM) ou encore de la visualisation de données (*dataviz*, *InfoVis*...). Il faudrait ainsi, dans l'absolu, mener une véritable évaluation de la méthode d'évaluation des modèles. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous n'avons pas poussé l'analyse jusque là, mais c'est un enjeux qui nous semble extrêmement important, pour être en mesure de qualifier et de comparer différentes méthodes d'évaluation, visuelles ou non, des modèles de simulation.

Visualiser, c'est apprendre Tout au long de son texte, BANOS (2013) met en avant un intérêt majeur (principe 1) à la modélisation : « modéliser c'est apprendre », principe qu'il reprend d'ailleurs comme titre pour la version publiée de ce travail universitaire (BANOS 2016). Il explicite ce parti pris en inscrivant la modélisation dans une démarche itérative et abductive : « Modéliser est en effet un processus fondamentalement itératif qui – et ce d'autant plus s'il est guidé par un principe d'abduction – implique une interaction forte entre le modèle développé et la vision progressivement construite du phénomène en question » (BANOS 2013, p. 77). Il nous semble que le processus itératif mentionné caractérise la modélisation en général, ne s'exprimant pas plus dans une visée abductive – que LIVET, PHAN et SANDERS (2014) associent aux modèles KISS par exemple – que dans des modèles plus empirico-inductifs (ou déductifs) tels que les modèles KIDS. L'itération est, nous semble-t-il, au cœur de toute démarche de modélisation, que celle-ci aille des hypothèses aux concepts, des données aux hypothèses, ou encore alterne entre les trois.

3. Il suffit de lire l'article qui introduit la publication des actes du colloque SAGEO 2005 pour s'en convaincre (JOSSELIN et LIBOUREL 2006).

4. Chez MINSKY (1965) par exemple : « To an observer B, an object A* is a model of an object A to the extent that B can use A* to answer questions that interest him about A. »

5. Par exemple autour de la chorématique de BRUNET (1980).

6. Par exemple chez PINCHEMEL (1979, p. 246–247), pour qui « seule la représentation cartographique fait ressortir les organisations géographiques, les structures et les systèmes géographiques. La carte, le langage cartographique apparaissent aussi comme l'expression, comme le révélateur privilégiés de la géographie. La pensée géographique se lit dans les représentations cartographiques ».

L'exploration visuelle de modèles s'inscrit elle aussi dans une logique très comparable, en favorisant également cette posture itérative et abductive (BANOS 2005, p. 239–240), présente dès les fondements de l'analyse exploratoire de données.

Dans le cadre d'une activité de modélisation, la visualisation permet, on l'a vu, des allers-retours thématiques et méthodologiques entre modélisateurs et thématiciens, mais doit aussi s'adapter aux différentes évolutions du modèle : les modifications des sorties, des mécanismes, de l'ordonnancement etc. ont des conséquences en matière de visualisation, puisqu'elles affectent les données sur lesquelles celles-ci se fondent. Quand bien même les données issues du modèle ne seraient pas amenées à évoluer, on peut concevoir la réalisation d'un processus de visualisation ou d'exploration visuelle dans les mêmes termes que le processus de modélisation (ANDRIENKO et al. 2018). La visualisation de données issues du modèle est donc en elle-même un processus itératif, et permet de plus de renforcer cette itération en permettant au modèle d'évoluer à mesure que les visualisations éclairent sa compréhension. L'exploration visuelle permet donc de gagner en compréhension sur le modèle, son objectif premier, mais aussi sur le système modélisé : en inscrivant le processus de modélisation-visualisation dans une boucle de rétroaction, on aboutit sur de nouvelles connaissances à propos du système-cible (figure 7.2). Comme le résume VICTOR (2009) à propos de l'exploration visuelle, interactive dans son cas, de modèles : « Model, Watch, Learn ».

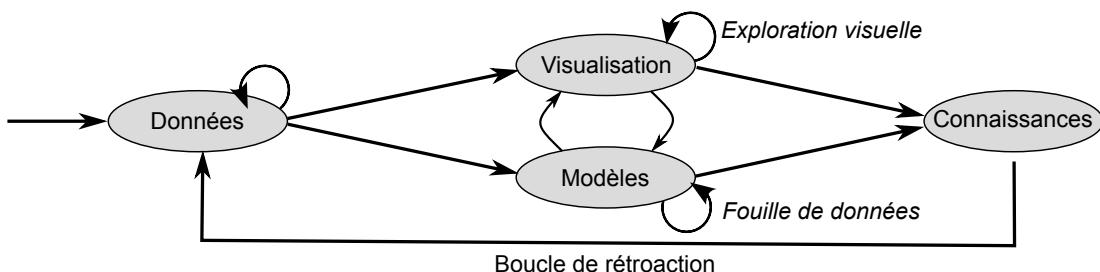


FIGURE 7.2 – Itérations entre modèles et visualisations pour enrichir les connaissances, traduit d'après KEIM et al. (2008, fig. 1, p. 156).

7.1.3 Comment passer de l'exploration à la validation ? Quelques perspectives

Dans le chapitre 3, on définissait et décrivait les différents enjeux et méthodes de l'évaluation de modèle. Notre approche, sur lesquels les paragraphes précédents constituent quelques retours, s'ancrait profondément dans une approche exploratoire et graphique, que nous dénommions « évaluation visuelle ». Au vu des très nombreuses étapes d'évaluation recommandées (cf. figures 3.2 et 3.3 du chapitre 3), la question d'une évaluation plus systématique des modèles se pose tout de même. On notait ainsi dans le chapitre 6 (cf. résultats) que l'incertitude et l'incomplétude des données thématiques, empiriques, empêchait de pousser plus avant le raffinement du calibrage et de l'évaluation de SimFeodal. Dans les paragraphes suivants, nous proposons quelques pistes pour améliorer les connaissances sur le modèle, et notamment sur ses qualités en termes de robustesse et de généricité.

Validation interne : quelques pistes pour une exploration plus systématique Une première piste, plusieurs fois évoquées auparavant, tient à l'usage de méthodes d'exploration de modèle plus automatisées et systématiques. Ces méthodes, relatives à la validation interne (cf. chap 3), permettent d'obtenir une compréhension plus globale et fine à la fois du modèle. Dans la description de l'analyse de sensibilité de SimFeodal (chap 6.2), on précisait que nous étions restreint à une analyse de type « one factor at a time », sans faire covarier les valeurs de paramètres. Dans le cadre d'un modèle véritablement complexe, qui plus est doté de très nombreux paramètres qui conditionnent des mécanismes dont l'interaction est importante⁷, il est évident que modifier chaque paramètre indépendamment des autres n'esquisse qu'une faible part de la variabilité que ceux-ci peuvent avoir sur les sorties du modèle. Au contraire, une analyse de sensibilité croisée, testant automatiquement différentes combinaisons de paramètres, permettrait de connaître de manière plus approfondie la gamme de réactions du modèle à des changements de paramètres.

Le principal défaut des méthodes croisées tient aux risques d'explosion combinatoire, qui plus est avec un modèle doté de très nombreux paramètres. Plutôt que de mener des analyses sur le plan complet, des méthodes ont été mises au point pour explorer l'espace des sorties d'un modèle. Celles-ci permettent, en suivant des heuristiques, de déterminer des sous-ensembles de valeurs à tester, que ce soit en suivant des logiques d'algorithmes génétiques (SCHMITT et al. 2015 ; REY-COYREHOURCQ 2015), des logiques de recherche d'optima locaux (SCHMITT 2014 ; REUILLON et al. 2015) ou encore de recherche de motifs dans les sorties (CHÉREL, COTTINEAU et REUILLON 2015).

Ces méthodes sont extrêmement prometteuses et utiles car elles permettent d'explorer la vaste étendue des comportements d'un modèle en restreignant fortement le nombre de simulations nécessaires. Elles requièrent toutefois la définition d'un faible nombre d'indicateurs de sortie, quantitatifs, sur lesquels les différents algorithmes pourront s'appuyer pour définir les valeurs de paramètres à échantillonner. De plus, l'exemple de l'exploration de l'espace des paramètres du modèle SimpopLocal (SCHMITT 2014) avec l'une de ces méthodes, « Calibration Profile » (REUILLON et al. 2015) montre que pour ce modèle KISS, doté de seulement 5 paramètres, 100 000 heures de calcul machine ont été nécessaires⁸. Sur un modèle moins parcimonieux, le temps nécessaire serait immense, sans même compter la consommation électrique correspondante. Pour SimFeodal, l'apport de connaissances et le raffinement de l'évaluation justifient-ils un tel coût ? Il nous semble que ces méthodes sont strictement inapplicables en l'état actuel du modèle, mais avec un important travail de réduction des paramètres et de quantification et synthèse des indicateurs de sortie, elles pourraient apporter des connaissances intéressantes sur le modèle et aider à le rendre plus générique. Enfin, vu la complexité des données que ces méthodes peuvent produire, il serait à nouveau utile de mener des phases

7. Voir par exemple les paramètres agissant de manière contre-intuitive, 6.2.3.

8. Réduites à 15 jours de calcul en utilisant les possibilités de calcul distribué mises à disposition par l'infrastructure de calcul intensif EGI.

d'exploration et d'interprétation, visuelle notamment, de leurs résultats. Quelle que soit la complexité et l'efficacité des méthodes de fouille automatique de données ou de modèles, il semble inévitable d'avoir à en mener des analyses de plausibilité visuelle pour en vérifier ou en comprendre les conclusions. Une plateforme telle que SimEDB serait entièrement adaptée à l'exploration visuelle des sorties de ces modèles de modèle.

Validation externe : données empiriques et confrontation Une seconde piste concerne cette fois-ci la validation externe, c'est-à-dire l'évaluation du modèle au regard des connaissances empiriques dont on dispose sur la période et la région d'étude. Cette approche, très classique, correspond à la « statistical validation » (fig. 3.2) ou « output validation » (fig. 3.3). Dans le cas de SimFeodal, nous pensions au départ de ce travail de thèse mener une confrontation, point par point, entre les nombreuses données archéologiques qui ont été compilées pour la Touraine (RODIER et SALIGNY (2010) par exemple), et les indicateurs correspondants du modèle. Très vite, on a pourtant réalisé qu'il serait vain de vouloir comparer les données issues d'un modèle de simulation descriptif et théorique, à des données empiriques lacunaires et d'un ordre de généralité bien moindre. Les degrés de précision de ces deux types de données à confronter sont ainsi trop différents pour être véritablement comparables.

Hors de la confrontation directe de l'ensemble des sorties du modèle avec les données empiriques correspondantes, on retrouve deux approches complémentaires (voir la figure 7.3) qui pourraient être intéressantes en perspectives d'évolution du modèle. Ces deux approches partent de données historiques et archéologiques pour concevoir des modèles, statistique dans un cas (GRAVIER 2018) et graphique dans l'autre (NAHASSIA 2019).

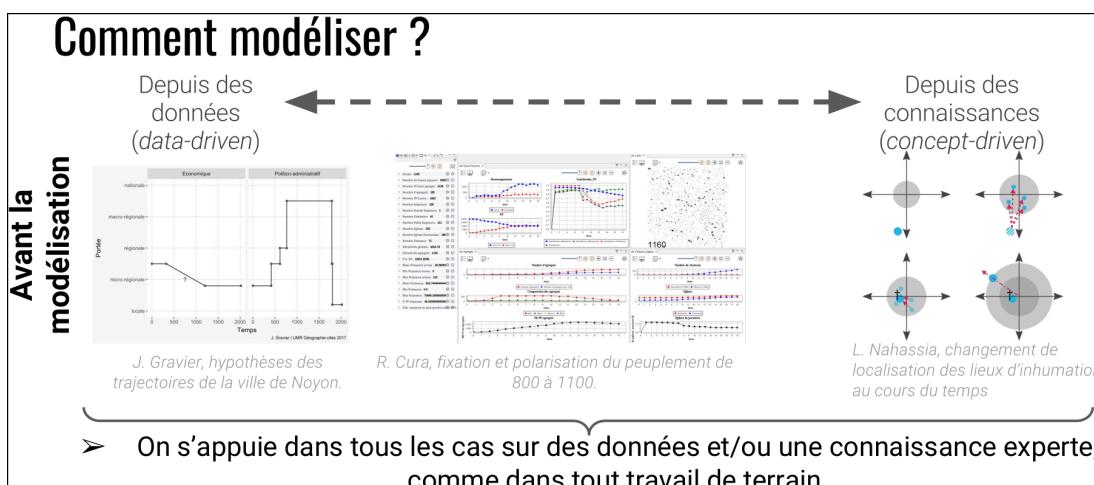


FIGURE 7.3 – Trois approches de modélisation différentes de processus sociaux et spatiaux sur le temps long (CURA, GRAVIER et NAHASSIA 2017).

GRAVIER (2018) prend appui sur la constitution de bases de données harmonisées, d'une résolution très fine et tendant vers l'exhaustivité. Elle mobilise ces données afin d'estimer statistiquement, entre autre, l'importance relative de différents lieux au regard de leurs relations et interactions. La diversité des sources archéologiques et historiques est donc importante, mais au service d'une seule question thématique, et l'hétérogénéité thématique des données

est donc assez restreinte. L'étendue spatiale de la zone modélisée est importante, mais comme le questionnement thématique est très circonscrit, la qualité des données permet d'y apporter une réponse robuste. Appliquée à SimFeodal, il s'agirait donc d'aller vers la constitution de bases de données cherchant l'exhaustivité et la précision, sur une diversité de questionnements plus restreinte : s'intéresser à des phénomènes très spécifiques, mais en mener une collecte et une analyse très poussée. On pourrait par exemple chercher des données correspondant à l'un des indicateurs du modèle, l'évolution de la distance moyenne à l'église paroissiale la plus proche par exemple. En se gardant d'incorporer ces données lors du calibrage du modèle, on pourrait alors constituer un jeu de données de test, composé de ces données empiriques précises, par lequel éprouver les données de sortie du modèle.

À l'opposée, NAHASSIA (2019) effectue une modélisation graphique à partir de connaissances théoriques, et éprouve les hypothèses qui en découlent, relative par exemple aux évolutions de localisation de différents types de structures intra-urbaines. L'évaluation de ses modèles graphiques consiste à confronter ces hypothèses aux riches données dont elle dispose pour la ville de Tours. La réduction de la masse de données ne se fait pas en restreignant la diversité thématique, mais en limitant le cas d'étude à une unique ville, point de départ d'une méthodologie reproductible et généralisable. En nous inspirant de cette approche, on pourrait par exemple chercher à collecter le maximum d'informations et de données sur une zone à l'étendue restreinte (une paroisse par exemple). Comme pour l'exemple précédent, on pourrait alors utiliser la correspondance spécifique de l'une des sous-régions modélisées comme critère d'ajustement. Cette réduction pourrait aussi être temporelle, en ne considérant comme « cible intermédiaire », comme dans la méthode POM (GRIMM et al. 2005), que l'accomplissement des faits stylisés choisis sur une partie limitée de la temporalité totale du modèle.

Dans les deux cas, ces possibilités d'évolution de l'évaluation du modèle procèdent de manière finalement assez similaire face à un problème commun. Il n'est en effet pas possible d'obtenir des éléments empiriques quantifiés sur l'ensemble de la diversité des processus modélisés, sur l'ensemble de la région et sur l'ensemble de la période. Une solution serait donc d'ajuster le modèle sur des sous-ensembles témoins de l'une ou plusieurs de ces dimensions (thématique, spatiale, temporelle). Cette approche est fréquemment utilisée pour les modèles statistiques prédictifs (scénarios démographiques et climatiques entre autre), qui peuvent par exemple avoir pour point de départ temporel une période relativement récente, et où on cherche à ce que les « rétro-prédictions » collent aux données empiriques déjà connues au moment de la création du modèle.

Validation croisée : désancker le modèle pour en évaluer la généricité

Une dernière piste, évoquée dès les prémisses de ce travail de thèse, consisterait à mener une évaluation par le biais de « scénarios régionaux ». Dans le chapitre précédent, nous présentions une analyse de scénarios thématiques qui nous paraissent intéressants au regard des questionnements des archéologues

et historiens de notre groupe de travail. Ces scénarios sont plausibles et doivent aider aussi bien à tester la robustesse du modèle face à des changements de valeurs de paramètres nets qu'à évaluer la réaction des interactions entre mécanismes dans des contextes thématiques légèrement différents (augmentation de la part des foyers paysans dépendants – serfs et esclaves –, hypothèses de croissance démographique...).

Les scénarios que nous entendons maintenant pour participer à l'évaluation du modèle seraient plutôt des scénarios régionaux, c'est-à-dire qu'ils viseraient à adapter les valeurs calibrées du modèle à d'autres contextes spatiaux et temporels. SimFeodal est un modèle qui se veut générique à l'Europe du Nord-Ouest, mais a été calibré sur une région particulière, la Touraine. En désançrant le modèle, c'est-à-dire en l'adaptant à une autre région dotée de paramètres différents, on pourrait ainsi procéder à une sorte de validation croisée (*cross validation*). Si le modèle, une fois ses *inputs* et paramètres de contexte adaptés à la description d'une autre région, produit des résultats plausibles pour les experts thématiciens de cette autre région, alors on peut penser que SimFeodal réussit à reproduire les faits stylisés recherchés de manière plus robuste qu'initialement. On sait que les faits stylisés modélisés dans SimFeodal sont génériques à l'Europe du Nord-Ouest, mais selon des rythmes et des proportions propres à chaque région. Si l'on prend l'exemple d'un diocèse montagnard, on pourrait alors diminuer les différents seuils de distance paramétrés selon des connaissances d'experts, ici pour tenir compte du relief plus difficile aboutissant à temps de parcours augmentés. Aboutirait-on à une concentration plus lente, moins nette, ou au contraire est-ce que ce processus serait accéléré et augmenté ? En travaillant avec des spécialistes historiques de ces régions, on pourrait ainsi tester la validité des hypothèses du modèle sur leurs propres terrains d'expertise.

Dans une temporalité ultérieure à celle du présent travail, un séminaire est déjà prévu et vise à éprouver SimFeodal sur d'autres régions dans lesquelles les historiens trouvent des similarités générales de changement de structure spatiales et sur lesquelles les sources empiriques paraissent suffisantes (Normandie, Champagne, Lorraine, Alsace, Flandre, Poitou, Provence, Quercy...). Là encore, pour le dialogue interdisciplinaire et inter-régional, l'utilisation de représentations graphiques interactives comme interface entre les chercheurs présenterait sans doute les mêmes avantages discutés dans ce travail de thèse.

Conclusion : Pour un recours systématique à la visualisation dans l'analyse de modèles Dans cette partie, nous sommes revenus sur les nombreux bénéfices que l'analyse exploratoire visuelle, largement reconnue vis-à-vis des données classiques, a pu apporter dans le cadre de notre expérience interdisciplinaire de conception et de développement de modèle, dont SimFeodal est le résultat. Plus largement, ce retour d'expérience nous conforte dans l'idée que la modélisation pourrait profiter d'un recours plus systématique à l'analyse visuelle des données produites. Cela nous semble résonner d'autant plus dans le cas des modèles spatiaux tant la pratique de la représentation graphique est ancrée dans la culture disciplinaire des géographes. Nous

ne pouvons pourtant, parallèlement, que constater la faiblesse de la production (carto)graphique dans le domaine de la modélisation (CURA 2020, introduction, p. N–N + 2), quand bien même les plateformes de simulation multi-agents rivalisent de possibilités en ce sens.

Afin d'encourager les modélisateurs à s'emparer de la question de la visualisation, nous avons montré que tout au long du cycle de développement d'un modèle, la visualisation peut aider le modélisateur et les spécialistes thématiques qui l'entourent : dès sa conception, en participant à la co-construction et au travail collaboratif (la visualisation comme interface interdisciplinaire, comme formalisme d'explicitation des composantes et sorties d'un modèle...); mais aussi, une fois le modèle implémenté, comme outil d'évaluation et support à une potentielle validation des modèles (validation interne, méthodes d'exploration automatiques et validation croisée).

Pour que ces apports soient complets et utiles à tous, le transfert disciplinaire ne peut être à sens unique : là où les géographes peuvent bénéficier des recherches en visualisation de données, celles-ci gagneraient aussi à affronter les problématiques propres aux données issues modèles de simulation géographiques que nous avons esquissé (section 7.1.1). Pour paraphraser BANOS (2013, p. 76), « il ne suffit pas de mettre en contact des disciplines pour que l'interdisciplinarité émerge. La pluridisciplinarité s'en contente facilement, mais l'interdisciplinarité implique des interactions entre disciplines et par conséquent une nécessaire acculturation [...] Donner les moyens aux géographes et, au delà, aux chercheurs en sciences humaines et sociales, de devenir plus autonomes dans leur démarche de [visualisation⁹] va [aussi] dans ce sens ».

9. « Modélisation » dans le texte original.

7.2 Retours sur la co-construction et l'évaluation collective d'un modèle

Tout au long de ce travail de thèse, nous avons choisi de tenir – et essayé de maintenir – un positionnement réellement collectif et collaboratif. Nous souhaitions, comme annoncé dans le chapitre 1, co-construire un modèle plutôt que de construire un modèle « pour » des collègues historiens et archéologues. Le travail de modélisation qui a abouti à SimFeodal a été initié au sein du projet ANR TransMonDyn, avant le début formel de ce travail de thèse. Ce travail de modélisation n'est pas achevé : son cadre dépasse celui de la thèse, et des projets en cours voire à l'état d'initialisation sont encore prévus pour faire vivre ce modèle et la démarche qui en a animé la construction, l'évaluation et l'utilisation. Le rendu de ce manuscrit est l'occasion de réaliser un point d'étape dans ce processus de modélisation qui s'inscrit résolument sur la longue durée, relativement à l'échelle de la recherche.

Ce point d'étape, présenté sous la forme d'un retour d'expérience structuré plutôt que chronologique,

, nous pousse à réaliser un bilan réflexif sur les conditions souhaitées mais aussi concrètement réalisées de construction du modèle SimFeodal.

7.2.1 Co-construction d'un modèle complexe : un retour d'expérience critique

Accompagnement à la modélisation et modélisation d'accompagnement - Rapide biblio sur démarche ComMod - Public différent - Approche comparable jusqu'au modèle implémenté : participation (faible mais réelle) au détail de certains mécanismes - Processus sur la longue durée à l'échelle de la recherche vs « besoin/reponse/sensibilisation »

Quelle prise en compte de l'hétérogénéité des pratiques et des besoins ? - Des diagrammes sagittaux à des exemples précis de résultat : donner au thématicien ce qu'il veut et comprend

Se positionner en modélisateur et en thématicien - Cf. Arnaud : modélicien

Les limites de l'implémentation - Logiciels de recherche, + équifinalité de l'implémentation + effets de bug + effets d'erreurs

7.2.2 Un modèle exploratoire, descriptif, générique, parsimonieux ?

Positionnement de SimFeodal dans une (Trans)Modélographie - Exercice de positionnement dans axes Clara + dire qu'une démarche avait été entreprise mais abandonnée par manque de temps à l'approche de la fin de TransMonDyn.

Une trajectoire de modélisation complexe - Évolutions du modèle : de + générique à + détaillé, puis - détaillé etc. - Exemple des règles et indicateurs liés aux lignages seigneuriaux

Modèles et trajectoires dans un espace en « fer à cheval » - Discussion avec Arnaud + schéma résultant : le coût de transition entre les cadrants est-il plus important dans certains sens ?

7.2.3 Construire et utiliser un modèle, deux approches et positions différentes

Modèle comme finalité, modèle comme apprentissage - On ressort l'argumentaire léna-esque habituel : enrichissement du à la formalisation et donc à l'explicitation. -> En plus, apport de l'implémentation et de l'évaluation : il faut trancher, il faut (parfois) quantifier,

Créateur et utilisateur : comment concilier des intérêts antagonistes ?
- attaquer par visions classiquement opposées du thématicien demandant détail et de l'informaticien-modélisateur cherchant parsimonie. - Solution optimale est forcément intermédiaire : approche SimFeodal : pas linéaire, mais tout de même du détail vers la parsomnie. - Opposée à approche inverse cf. RIN ATP (publi ?) de multi-modelling, = commencer par le plus simple et complexifier jusqu'à atteindre satisfaction des thématiciens

Des gains, certes, mais pour qui ? - Question principale : quelle discipline/champ scientifique veut-on faire avancer ? -> objectif théorique d'un projet interdisciplinaire : chacune des disciplines

Conclusion : Modéliser avec et pour les autres - rubber duck, « gardien de la vérité éprouvée », - Objectifs collectifs + objectifs individuels pour chacun

Conclusion

Conclusion

Références

- AERES (2014). *Critères d'évaluation Des Entités de Recherche : Le Référentiel de l'AERES*. Paris : AERES, p. 40. URL : <https://www.hceres.fr/fr/publications/criteres-devaluation-des-entites-de-recherche-le-referentiel>.
- AGARWAL, Sameer et al. (2013). « BlinkDB : Queries with Bounded Errors and Bounded Response Times on Very Large Data ». In : *Proceedings of the 8th ACM European Conference on Computer Systems*. EuroSys '13. 00474. New York, NY, USA : ACM, p. 29-42. DOI : 10/bwrd. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2465351.2465355>.
- AMBLARD, Frédéric, Juliette ROUCHIER et Pierre BOMMEL (2006). « Evaluation et Validation de Modèles Multi-Agents ». In : *Modélisation et simulation multi-agents. Applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Hermès, p. 103-140.
- AMIRPOUR AMRAII, Saman (2018). « Human-Data Interaction in Large and High-Dimensional Data ». PhD Thesis. University of Pittsburgh.
- ANDRIENKO, Natalia et Gennady ANDRIENKO (2006). *Exploratory Analysis of Spatial and Temporal Data*. Springer Berlin, Germany.
- ANDRIENKO, Natalia et al. (2018). « Viewing Visual Analytics as Model Building ». In : *Computer Graphics Forum*. DOI : 10/gdv9s7. URL : <http://doi.wiley.com/10.1111/cgf.13324>.
- ARCHAEOEMEDES (1998). *Archaeomedes : Des Oppida Aux Métropoles*. Avec la coll. de François DURAND-DASTES et al. Paris : Anthropos.
- AUGUSIAK, Jacqueline, Paul J. Van den BRINK et Volker GRIMM (2014). « Merging Validation and Evaluation of Ecological Models to 'Evaluation' : A Review of Terminology and a Practical Approach ». In : *Ecological Modelling*. Population Models for Ecological Risk Assessment of Chemicals 280, p. 117-128. DOI : 10/f52827. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380013005450>.
- BACH, Benjamin et al. (2014). « A Review of Temporal Data Visualizations Based on Space-Time Cube Operations ». In : *Eurographics Conference on Visualization*.

- BALCI, Osman (1994). « Validation, Verification, and Testing Techniques throughout the Life Cycle of a Simulation Study ». In : *Annals of operations research* 53.1, p. 121-173. DOI : 10/ctgcxd.
- (1997). « Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models ». In : *Proceedings of the 1997 WSC*. Winter Simulation Conference. Atlanta, Georgia, p. 135-141.
- (1998). « Verification, Validation, and Accreditation ». In : *Proceedings of the 1998 WSC*. Winter Simulation Conference. T. 1. IEEE, p. 41-48.
- BANOS, Arnaud (2005). « La Voie de l'étonnement : Favoriser l'abduction Dans Les Systèmes d'Information Géographique ». In : *Apport Des SIG à La Recherche*. Colloque International Géomatique et Applications N° 1. Sous la dir. de Jean-Marie FOTSING. Orléans : Presses Universitaires d'Orléans, p. 237-254.
- (2013). « Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en Géographie et SHS ». Habilitation à Diriger des Recherches. Paris : Université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne. 107 p. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01112668/document>.
- (2016). *Modéliser, c'est apprendre : Itinéraire d'un géographe*. Avec la coll. de Michel BUSSI. Modélisations, simulations, systèmes complexes. Paris : Matériologiques. 104 p. URL : <https://www.decitre.fr/livres/modeliser-c-est-apprendre-9782373610802.html>.
- BARABÁSI, Albert-László et Réka ALBERT (1999). « Emergence of Scaling in Random Networks ». In : *Science* 286.5439, p. 509-512. DOI : 10/ccsmnz. pmid : 10521342. URL : <https://science.sciencemag.org/content/286/5439/509>.
- BARRETEAU, Olivier et al. (2003). « Our Companion Modelling Approach ». In : Citation Key Alias : barreteau_our_2003-1, others_our_nodate. URL : <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/1.html>.
- BARTHÉLEMY, Dominique (1993). *La Société Dans Le Comté de Vendôme : De l'an Mil Au XIVe Siècle*. Fayard.
- BATTY, Michael (2006). « Rank Clocks ». In : *Nature* 444.7119, p. 592-596. DOI : 10.1038/nature05302. URL : <https://www.nature.com/articles/nature05302>.
- (2015). « A Perspective on City Dashboards ». In : *Regional Studies, Regional Science* 2.1. 00016, p. 29-32. DOI : 10/gfw9mr. URL : <https://doi.org/10.1080/21681376.2014.987540>.
- BENENSON, Itzhak, Erez HATNA et Ehud OR (2009). « From Schelling to Spatially Explicit Modeling of Urban Ethnic and Economic Residential Dynamics ». In : *Sociological Methods & Research* 37.4, p. 463-497. DOI : 10.1177/0049124109334792. URL : <https://doi.org/10.1177/0049124109334792>.
- BERRY, Brian J. L. et Adam OKULICZ-KOZARYN (2012). « The City Size Distribution Debate : Resolution for US Urban Regions and Megalopolitan Areas ». In : *Cities. Current Research on Cities* 29, S17-S23. DOI : 10.1016/j.cities.2011.11.007. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275111001363>.
- BEZANSON, Jeff et al. (2014). « Julia : A Fresh Approach to Numerical Computing ». In : URL : <http://arxiv.org/abs/1411.1607>.

- BIMONTE, S., A. TCHOOUNIKINE et M. MIQUEL (2005). « Towards a Spatial Multi-dimensional Model ». In : *Proceedings of the 8th ACM International Workshop on Data Warehousing and OLAP*. DOLAP '05. 00075. New York, NY, USA : ACM, p. 39-46. DOI : 10/cfn8w7. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1097002.1097009>.
- BIMONTE, Sandro (2007). *Intégration de l'information Géographique Dans Les Entrepôts de Données et l'analyse En Ligne : De La Modélisation à La Visualisation*. 00029. Lyon, INSA. URL : <http://www.theses.fr/2007ISAL0105>.
- BOKEH, Development Team (2014). *Bokeh : Python Library for Interactive Visualization*. URL : <https://docs.bokeh.org/en/latest/index.html>.
- BOSTOCK, Mike (2018). *A Better Way to Code*. URL : <https://medium.com/@mbostock/a-better-way-to-code-2b1d2876a3a0>.
- BRATMAN, Michael E, David J ISRAEL et Martha E POLLACK (1988). « Plans and Resource-Bounded Practical Reasoning ». In : *Computational intelligence* 4.3, p. 349-355. DOI : 10/b6sdrg.
- BRETAGNOLLE, Anne et Alain FRANC (2018). « Transition 9 : Vers Des Systèmes de Villes Intégrés (France, Xviie-Xixe Siècles) ». In : *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Sous la dir. de Lena SANDERS. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 333-359. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10632>.
- BRUNET, Roger (1980). « La Composition Des Modèles Dans l'analyse Spatiale ». In : *L'Espace géographique*, p. 253-265. DOI : 10/gf9f5z.
- BRUNSDON, Chris (1998). « Exploratory Spatial Data Analysis and Local Indicators of Spatial Association with XLISP-STAT ». In : *Journal of the Royal Statistical Society : Series D (The Statistician)* 47.3, p. 471-484. DOI : 10.1111/1467-9884.00148. URL : <https://rss.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-9884.00148>.
- CHANG, Winston et al. (2015). « Shiny : Web Application Framework for R ». In : *R package version 0.11 1.4. 00553*, p. 106.
- CHAREILLE, Pascal, Xavier RODIER et Elisabeth ZADORA-RIO (2008). « Dynamiques Morphologiques et Échelles d'analyse Des Territoires ». In : *Des Paroisses de Touraine Aux Communes d'Indre-et-Loire. La Formation Des Territoires*. Sous la dir. d'Elisabeth ZADORA-RIO. FERACF, p. 260-263. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00956186>.
- CHÉREL, Guillaume, Clémentine COTTINEAU et Romain REUILLOU (2015). « Beyond Corroboration : Strengthening Model Validation by Looking for Unexpected Patterns ». In : *PLOS ONE* 10.9, e0138212. DOI : 10/gddwr3. URL : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0138212>.
- COMIN, Marie-Noëlle (2009). « Réseaux de Villes et Réseaux d'innovation En Europe : Structuration Du Système Des Villes Par Les Réseaux de Recherche Sur Les Technologies Convergentes ». PhD Thesis. Paris 1.
- COMMENGES, Hadrien et al. (2014). *R et espace : Traitement de l'information géographique*. Groupe ElementR. Lyon : Framabook.
- COMMOD (2015). *La modélisation d'accompagnement : partager des représentations, simuler des dynamiques*. Sous la dir. de Michel ÉTIENNE. École-chercheurs

- INRA 4. Bouaye : FormaSciences, FPN, INRA. 299 p. URL : <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20163154613>.
- COMMOD, Collectif (2005). « La modélisation comme outil d'accompagnement ». In : *Natures Sciences Sociétés* 13.2, p. 165-168. DOI : 10.1051/nss:2005023. URL : <https://www.nss-journal.org/articles/nss/abs/2005/02/nss5207/nss5207.html>.
- COUPÉ, Christophe et al. (2018). « Transition 1 : Modéliser Les Migrations et La Colonisation de Nouveaux Territoires Par Les Homo Sapiens ». In : SANDERS, Lena. *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 113-142. DOI : 10.4000/books.pufr.10467. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02025441>.
- CROOKS, Andrew et al. (2019). *Agent-Based Modelling and Geographical Information Systems : A Practical Primer*. 1 edition. Thousand Oaks, CA : SAGE Publications Ltd. 408 p. URL : <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/agent-based-modelling-and-geographical-information-systems/book250134>.
- CURA, Robin (2011). « Conception de modèles et d'outils de géosimulation ». Mémoire - Rapport de stage. Paris : Université de Paris 1 Panthéon Sorbonne. 58 p. URL : https://documentation.ensg.eu/index.php?lvl=notice_display&id=50345.
- (2015). « Créer des documents reproductibles et des applications web interactives d'analyse de données avec R : Knitr & Shiny ». http://umr5600.ish-lyon.cnrs.fr/20150610_EVS-ISIG_CafeMethodo. URL : <https://github.com/RCura/CafeMethodo>.
 - (2017a). « Making Large Spatio-Temporal Data Analysis Easier. Illustrated Plea for Using (Geo)Visual Analytics. » cites : cura_making_2017. URL : <http://www.geog.leeds.ac.uk/ectqg17/home.html>.
 - (2017b). « « TimeLineEDB », application web d'exploration interactive de données de géolocalisation ». In : *M@ppemonde* 120.2015/4. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01935702/document>.
 - (2019). « Enriching Exploratory Spatial Data Analysis with Modern Computer Tools ». URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02290556>.
 - (2020). « Visualisation de modèle ». In : PUMAIN, Denise. *La modélisation en géographie. Villes et territoires*. Méthodologies de modélisation en sciences sociales. Paris : ISTE, p. 151-193.
- CURA, Robin, Julie GRAVIER et Lucie NAHASSIA (2017). « Comprendre les dynamiques d'un territoire qui n'existe plus : quelles alternatives au terrain pour l'étude d'un espace sur le temps long ? » In : *Journée des jeunes chercheurs de l'Institut de Géographie de Paris (JIG 2017)*. Ecole Doctorale de Géographie de Paris. Paris, France. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02296147>.
- CURA, Robin et al. (2014). « VisuAgent – Un Environnement d'exploration Visuelle de Données Spatio-Temporelles Issues de Simulation ». In : SAGEO 2014. Session Demo. SAGEO 2014, Atelier Démo. Grenoble. URL : <http://rcura.github.io/VisuAgent/>.

- CURA, Robin et al. (2017a). « The Old and the New : Qualifying City Systems in the World with Classical Models and New Data ». In : *Geographical Analysis* 49.4, p. 363-386. DOI : 10/gb45hw. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gean.12129>.
- CURA, Robin et al. (2017b). « Transition 8 : 800-1100. Fixation, Polarisation et Hiérarchisation de l'habitat Rural En Europe Du Nord-Ouest ». In : *Peupler La Terre - De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Sous la dir. de Lena SANDERS. Perspectives Villes et Territoires. Presses universitaires François Rabelais, p. 301-332. DOI : 10.4000/books.pufr.10620. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01666498>.
- DAUDÉ, Eric (2002). « Modélisation de la diffusion d'innovations par la simulation multi-agents. L'exemple d'une innovation en milieu rural. » thesis. Avignon. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00440100>.
- DAUDÉ, Eric et Patrice LANGLOIS (2006). « Comparaison de Trois Implémentations Du Modèle de Schelling ». In : *Modélisation et Simulation Multi-Agents. Applications Pour Les Sciences de l'Homme et de La Société*. Sous la dir. d'HERMÈS, p. 411-441. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01082655>.
- DE RUNZ, Cyril (2008). « Imperfection, Temps et Espace : Modélisation, Analyse et Visualisation Dans Un SIG Archéologique ». Université de Reims-Champagne Ardenne.
- DOS SANTOS, Selan et Ken BRODLIE (2004). « Gaining Understanding of Multivariate and Multidimensional Data through Visualization ». In : *Computers & Graphics* 28.3, p. 311-325. DOI : 10/cttwpw. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849304000251>.
- DUBOS-PAILLARD, Edwige, Yves GUERMOND et Patrice LANGLOIS (2003). « Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire. Le modèle SpaCelle ». In : *LEspace géographique* tome 32.4, p. 357-378. URL : <https://www.cairn.info/revue-espace-geographique-2003-4-page-357.htm>.
- DUBY, Georges, éd. (1967). *L'An Mil*. T. 30. Paris, France : Julliard. 237 ; 16.
- DURAND-DASTÈS, François (1995). « Les Modèles En Géographie ». In : *Bailly A., Ferras R., Pumain D., Encyclopédie de La Géographie*. 2ème édition. Chapitre 16, p. 293-307.
- EDMONDS, Bruce et Scott MOSS (2005). « From KISS to KIDS – An 'Anti-Simplistic' Modelling Approach ». In : *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*. Sous la dir. de Paul DAVIDSSON, Brian LOGAN et Keiki TAKADAMA. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, p. 130-144. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-32243-6_11.
- EILERS, Dennis et al. (2017). « It's Not a Bug, It's a Feature : How Visual Model Evaluation Can Help to Incorporate Human Domain Knowledge in Data Science ». In :
- ELLIOTT, Roxana (2017). *How Page Load Time Affects Bounce Rate and Page Views*. Avec la coll. de SECTION.IO. URL : <https://www.section.io/blog/page-load-time-bounce-rate/>.
- ELMQVIST, Niklas (2011). « Embodied Human-Data Interaction ». In : *ACM CHI 2011 Workshop "Embodied Interaction : Theory and Practice in HCI*, p. 104-107.

- EPSTEIN, Joshua M (2006). « Remarks on the Foundations of Agent-Based Generative Social Science ». In : *Handbook of Computational Economics*. T. 2. 34. Elsevier, p. 1585-1604.
- EPSTEIN, Joshua M. et Robert L. AXTELL (1996). *Growing Artificial Societies : Social Science from the Bottom Up*. 05176. Washington, D.C : MIT Press. 228 p.
- ETIENNE, Michel (2009). « Co-Construction d'un Modèle d'accompagnement Selon La Méthode ARDI : Guide Méthodologique ». In : *Laudun, Cardère éditeur*.
- FAVORY, François et al. (2018). « Transition 7 : Du Monde Antique Au Monde Médiéval (IVe-VIIIe Siècles) ». In : *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Sous la dir. de Lena SANDERS. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 273-299. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10611>.
- FEKETE, Jean-Daniel (2010). « Infrastructure ». In : *Mastering the Information Age - Solving Problems with Visual Analytics*. Sous la dir. d'Eurographics ASOCIATION. Eurographics Association, p. 87-108. URL : <https://hal.inria.fr/hal-00696814>.
- FEKETE, Jean-Daniel et al. (2019). « Progressive Data Analysis and Visualization ». In : Dagstuhl Seminar 18411. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik. URL : <https://www.dagstuhl.de/en/program/calendar/semp/semnr=18411>.
- FERDIÈRE, Alain et al. (2000). « La modélisation des systèmes de peuplement : débat à propos d'un ouvrage récent, Des Oppida aux métropoles ». In : URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00591267>.
- FEW, Stephen (2006a). *Information Dashboard Design : The Effective Visual Communication of Data*. O'Reilly Media, Inc.
- (2006b). « Multivariate Analysis Using Parallel Coordinates ». In : *Perceptual edge*. 00039, p. 1-9.
- FORCH, Valentin et al. (2017). « Are 100 Ms Fast Enough ? Characterizing Latency Perception Thresholds in Mouse-Based Interaction ». In : *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics : Cognition and Design*. Sous la dir. de Don HARRIS. Lecture Notes in Computer Science. 00001. Springer International Publishing, p. 45-56.
- FOSSIER, Robert (1982). *Enfance de l'Europe : Xe-XIIe Siècles : Aspects Économiques et Sociaux*. T. 1. Presses universitaires de France.
- FOTHERINGHAM, A. Stewart (1999). « Trends in Quantitative Methods III : Stressing the Visual ». In : *Progress in Human Geography* 23.4. 00038, p. 597-606. DOI : 10/c549jd. URL : <https://doi.org/10.1191/030913299667756016>.
- GINOT, Vincent et Hervé MONOD (2005). « Explorer Les Modeles Par Simulation : Application Aux Analyses de Sensibilité ». In : AMBLARD, F et Denis PHAN. *Modélisation et Simulation Multi-Agents : Applications Pour Les Sciences de l'Homme et de La Société*, Chapitre. T. 3, p. 75-101.
- GOWDA, Shashi (2018). *Escher - Composable Web UIs in Julia*. JuliaGizmos. URL : <https://github.com/JuliaGizmos/Escher.jl>.
- GRAUWIN, Sébastien, Florence GOFFETTE-NAGOT et Pablo JENSEN (2012). « Dynamic Models of Residential Segregation : An Analytical Solution ». In : *Jour-*

- nal of Public Economics* 96.1, p. 124-141. DOI : 10/fhrx73. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0047272711001526>.
- GRAVIER, Julie (2018). « Deux mille ans d'une ville en système. Proposition d'une démarche appliquée au cas de Noyon ». Thèse de Doctorat. Paris : Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. 404 p. URL : <http://www.theses.fr/s91330>.
- GRIGNARD, Arnaud et Alexis DROGOUL (2017). « Agent-Based Visualization : A Real-Time Visualization Tool Applied Both to Data and Simulation Outputs ». In : *The AAAI-17 Workshop on Human-Machine Collaborative Learning*. Association for the Advancement of Artificial Intelligence 17. 00002.
- GRIMM, Volker, Gary POLHILL et Julia TOUZA (2017). « Documenting Social Simulation Models : The ODD Protocol as a Standard ». In : *Simulating Social Complexity : A Handbook*. Sous la dir. de Bruce EDMONDS et Ruth MEYER. Understanding Complex Systems. Cham : Springer International Publishing, p. 349-365. DOI : 10.1007/978-3-319-66948-9_15. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-319-66948-9_15.
- GRIMM, Volker et al. (2005). « Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based Complex Systems : Lessons from Ecology ». In : *science* 310.5750, p. 987-991. DOI : 10/fk5wc4.
- GRIMM, Volker et al. (2010). « The ODD Protocol : A Review and First Update ». In : *Ecological Modelling* 221.23, p. 2760-2768. DOI : 10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438001000414X>.
- HAGERSTRAND, Torsten (1952). *The Propagation of Innovation Waves*.
- HAINING, R., S. WISE et J. MA (1998). « Exploratory Spatial Data Analysis ». In : *Journal of the Royal Statistical Society : Series D (The Statistician)* 47.3, p. 457-469. DOI : 10.1111/1467-9884.00147. URL : <https://rss.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-9884.00147>.
- HAMBY, D. M. (1994). « A Review of Techniques for Parameter Sensitivity Analysis of Environmental Models ». In : *Environmental Monitoring and Assessment* 32.2, p. 135-154. DOI : 10/bp38m8. URL : <https://doi.org/10.1007/BF00547132>.
- HARMELIN-VIVIEN, M. L. et al. (1985). « Evaluation Visuelle Des Peuplements et Populations de Poissons Méthodes et Problèmes ». In :
- HEALY, Kieran (2018). *Data Visualization : A Practical Introduction*. 00000. S.l. : Princeton University Press. 304 p. URL : <http://socviz.co/>.
- HEINRICH, Julian et Daniel WEISKOPF (2013). « State of the Art of Parallel Coordinates ». In : Eurographics (STARs), p. 95-116. DOI : 10/gd87qm. URL : <https://diglib.eg.org:443/handle/10.2312/conf.EG2013.stars.095-116>.
- HEPPENSTALL, Alison J, Andrew J EVANS et Mark H BIRKIN (2007). « Genetic Algorithm Optimisation of An Agent-Based Model for Simulating a Retail Market ». In : *Environment and Planning B : Planning and Design* 34.6, p. 1051-1070. DOI : 10.1068/b32068. URL : <https://doi.org/10.1068/b32068>.
- HERMANN, Charles (1967). « Validation Problems in Games and Simulations with Special Reference to Models of International Politics ». In : *Behavioral*

- Science 12.3. DOI : 10 / bgxt27. URL : <https://search.proquest.com/docview/1301283984/citation/55E2BF95468440A1PQ/1>.
- HIRTZEL, Joanne (2015). « Exploration Prospective Des Mobilités Résidentielles Dans Une Agglomération Urbaine Au Moyen d'un Modèle de Simulation Multi-Agents (MOBISIM) ». Université de Franche-Comté.
- HORST, G. L., M. C. ENGELKE et W. MEYERS (1984). « Assessment of Visual Evaluation Techniques 1 ». In : *Agronomy Journal* 76.4, p. 619-622. DOI : 10 / br3zkb. URL : <https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/76/4/AJ0760040619>.
- IANNONE, Richard, Joseph J. ALLAIRE et Barbara BORGES (2018). *Flexdashboard : R Markdown Format for Flexible Dashboards*. 00000 R package version 0.5.1.1. URL : <https://CRAN.R-project.org/package=flexdashboard>.
- IMAGEMAGICK STUDIO, LLC (2008). « ImageMagick ». In :
- IMBS, Paul et Bernard QUEMADA (1992). *Trésor de La Langue Française*. Éditions du Centre national de la recherche scientifique.
- INSELBERG, Alfred et Bernard DIMSDALE (1987). « Parallel Coordinates for Visualizing Multi-Dimensional Geometry ». In : *Computer Graphics* 1987. 01538. Springer, p. 25-44.
- INSTITUTE, SAS (1990). *SAS/STAT User's Guide : Version 6*. T. 2. Sas Inst.
- ISO, International Organization for Standardization (2018). 9241-11 :2018 - *Ergonomie de l'interaction homme-système - Utilisabilité*. URL : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:fr>.
- JOSSELIN, Didier et Thérèse LIBOUREL (2006). « Presentation : Spatial Analysis and GEOMatics. Conference SAGEO'2005, Avignon, France ». In : *Cybergeo : European Journal of Geography*. DOI : 10 / bwdsn9. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/2909>.
- KAPLAN, Frédéric (2013). *Lancement de la « Venice Time Machine »*. URL : <https://fk Kaplan.wordpress.com/2013/03/14/lancement-de-la-venice-time-machine/>.
- KEIM, Daniel et al. (2008). « Visual Analytics : Definition, Process, and Challenges ». In : *Information Visualization*. Springer, p. 154-175.
- KEIM, Daniel et al. (2010). *Mastering the Information Age Solving Problems with Visual Analytics*. 00019. Eurographics Association.
- KENNEDY, Ryan C. et al. (2006). « Verification and Validation of Agent-Based and Equation-Based Simulations : A Comparison ». In : *Simulation series* 38.2, p. 95.
- KITCHIN, Rob, Tracey P. LAURIAULT et Gavin MCARDLE (2015). « Knowing and Governing Cities through Urban Indicators, City Benchmarking and Real-Time Dashboards ». In : *Regional Studies, Regional Science* 2.1. 00169, p. 6-28. DOI : 10 / gc92g7. URL : <https://doi.org/10.1080/21681376.2014.983149>.
- KLÜGL, Franziska (2008). « A Validation Methodology for Agent-Based Simulations ». In : *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Applied Computing*. SAC '08. New York, NY, USA : ACM, p. 39-43. DOI : 10 / dpkh42. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1363686.1363696>.
- LAKE, Mark W. (2014). « Trends in Archaeological Simulation ». In : *Journal of Archaeological Method and Theory* 21.2, p. 258-287. DOI : 10 / gd6b57. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s10816-013-9188-1>.

- LAURINI, Robert (2018). « From GIS to Smart Cities : Key-Concept Landmarks ». In : *AIAP'18. International Conference on Artificiel Intelligence and Its Application*. Sous la dir. de Brahim LEJDEL, Mohammed-Khireddine KHOLLADI et Mohammed Charaf Eddine MEFTAH. El Oued, Algeria.
- LE BRAS, Gabriel et Marthe LE BRAS-FOLAIN (1976). *L'église et le village*. Nouvelle bibliothèque scientifique. Paris : Flammarion. 289 p. URL : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k34031818>.
- LIU, Z. et J. HEER (2014). « The Effects of Interactive Latency on Exploratory Visual Analysis ». In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 20.12. 00125, p. 2122-2131. DOI : 10/f3tvrw.
- LIVET, Pierre, Denis PHAN et Lena SANDERS (2014). « Diversité et Complémentarité Des Modèles Multi-Agents En Sciences Sociales ». In : *Revue française de sociologie* 55.4, p. 689-729. DOI : 10/gfw9pr.
- MACEACHREN, Alan M. et al. (2004). « Geovisualization for Knowledge Construction and Decision Support ». In : *IEEE computer graphics and applications* 24.1. 00256, p. 13-17. pmid : 15384662. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3181162/>.
- MACKENZIE, I. Scott et Colin WARE (1993). « Lag As a Determinant of Human Performance in Interactive Systems ». In : *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '93. 00442. New York, NY, USA : ACM, p. 488-493. DOI : 10/dr7rj6. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/169059.169431>.
- MATHIAN, Hélène et Lena SANDERS (2014). *Objets Géographiques et Processus de Changement : Approches Spatio-Temporelles*. Systèmes d'information Géographique. ISTE Editions. 178 p.
- MATHIAN, Hélène et Cécile TANNIER (2015). « Formalisation des interactions spatiales dans les modèles multi-agents - Essai d'analyse comparative ». In : *Revue Internationale de Géomatique* 25.3, p. 393-414. DOI : 10.3166/RIG.25.393-414. URL : <http://dx.doi.org/10.3166/RIG.25.393-414>.
- MINSKY, Marvin (1965). « Matter, Mind and Models ». In : *Proc. International Federation of Information Processing Congress* 1, p. 45-49. URL : <https://web.media.mit.edu/~minsky/papers/MatterMindModels.html>.
- MIROT, Albert (1950). *Manuel de Géographie Historique de La France*. 2ème. T. 2. 2 t. Paris : Picard et Compagnie. 310-619.
- MITHEN, Steven (2018). « Simulating Prehistoric Hunter-Gatherer Societies ». In : *Simulating Societies*. Routledge, p. 165-193.
- MORIN, Edgar (1994). « Sur l'interdisciplinarité ». In : *Bulletin interactif du Centre international de recherches et études transdisciplinaires* 2.2. URL : <https://ciret-transdisciplinarity.org/bulletin/b2c2.php>.
- MORTIER, Richard et al. (2014). *Human-Data Interaction : The Human Face of the Data-Driven Society*. SSRN Scholarly Paper ID 2508051. Rochester, NY : Social Science Research Network. URL : <https://papers.ssrn.com/abstract=2508051>.
- MOSIER, Charles I. (1947). « A Critical Examination of the Concepts of Face Validity ». In : *Educational and Psychological Measurement* 7.2, p. 191-205. DOI : 10/ck5pmh.

- NAHASSIA, Lucie (2019). « Formes spatiales et temporelles du changement urbain. Analyser la localisation des activités à Tours sur 2 000 ans. » Thèse de Doctorat. Paris : Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. 466 p.
- NAYLOR, Thomas H. et J. M. FINGER (1967). « Verification of Computer Simulation Models ». In : *Management Science* 14.2, B92-B106. DOI : 10/fmcsv4. URL : <https://www.jstor.org/stable/2628207>.
- NEVO, Baruch (1985). « Face Validity Revisited ». In : *Journal of Educational Measurement* 22.4, p. 287-293. DOI : 10/btf77x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-3984.1985.tb01065.x>.
- NGO, The An et Linda SEE (2012). « Calibration and Validation of Agent-Based Models of Land Cover Change ». In : *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Sous la dir. d'Alison J. HEPPENSTALL et al. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 181-197. DOI : 10.1007/978-90-481-8927-4_10. URL : https://doi.org/10.1007/978-90-481-8927-4_10.
- NIELSEN, Jakob (2009). *Powers of 10 : Time Scales in User Experience*. URL : <https://www.nngroup.com/articles/powers-of-10-time-scales-in-ux/>.
- NUNINGER, Laure et al. (2017). « Un Cadre Conceptuel Générique Pour Décrire Des Transitions Dans Les Systèmes de Peuplement : Application à Un Corpus de Douze Transitions Entre 70 000 BP et 2 050 ». In : SANDERS, Lena. *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 55-88. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10527>.
- NYKAMP, Duane Q. (2015a). *Function Machine Parameters*. URL : http://mathinsight.org/function_machine_parameters.
- (2015b). *Parameter Definition*. URL : <http://mathinsight.org/definition/parameter>.
- O'SULLIVAN, David et George L. W. PERRY (2013). *Spatial Simulation : Exploring Pattern and Process*. Chichester, West Sussex, UK : John Wiley & Sons Inc. 305 p.
- OURIACHI, Marie-Jeanne, Frédérique BERTONCELLO et Alain FRANC (2018). « Transition 6 Dite « Romanisation » (IIe Siècle Av. J.-C. - Ier Siècle Apr. J.-C) ». In : *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Sous la dir. de Lena SANDERS. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 243-271. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10605>.
- OURIACHI, Marie-Jeanne et al. (2017). « De l'élaboration de La Transition à Sa Modélisation : Retours Interdisciplinaires Sur l'expérience TransMonDyn ». In : *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Sous la dir. de Lena SANDERS. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 461-485. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10671>.
- (2018). « De l'élaboration de La Transition à Sa Modélisation : Retours Interdisciplinaires Sur l'expérience TransMonDyn ». In : *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Sous la dir. de Lena SANDERS. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 461-485. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10671>.

- PAFKA, Szilard (2017). *Benchm-Databases : A Minimal Benchmark of Various Tools (Statistical Software, Databases Etc.) for Working with Tabular Data of Moderately Large Sizes (Interactive Data Analysis)*. URL : <https://github.com/szilard/benchm-databases>.
- PANDRE, Andrew (2011). *Charts and Their Dimensionality*. URL : <https://apandre.wordpress.com/dataviews/dimensionality/>.
- Parameter (Computer Programming) (2017). In : *Wikipedia*. Page Version ID : 815191973. URL : [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Parameter_\(computer_programming\)&oldid=815191973](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Parameter_(computer_programming)&oldid=815191973).
- PATEL, Neil (2011). *Speed Is A Killer*. 00000. URL : <https://neilpatel.com/blog/speed-is-a-killer/>.
- PETTY, Mikel D (2010). « Verification, Validation, and Accreditation ». In : *Modeling and simulation fundamentals : Theoretical underpinnings and practical domains*, p. 325-372. DOI : 10/bvhqd6.
- PHAN, Denis (2014). « Ontologies et modélisation par SMA en SHS ». In : *Ontologies et modélisation par SMA en SHS*. Hermes Science Publ.-Lavoisier, p. 53-94.
- PINCHEMEL, Philippe (1979). « Géographie et Cartographie, réflexions historiques et épistémologiques ». In : *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 56.462, p. 239-247. DOI : 10/gfw9n6. URL : https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_1979_num_56_462_5108.
- PLOTLY (2017). *Introducing Dash*. URL : <https://medium.com/@plotlygraphs/introducing-dash-5ecf7191b503>.
- PUMAIN, Denise (2004). *Modèle Gravitaire - Hypergéo*. URL : <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article76>.
- PUMAIN, Denise et Thérèse SAINT-JULIEN (2001). « Les Interactions Spatiales ». In : *Armand Colin, Paris*, p. 19-31.
- PUMAIN, Denise et al. (2015). « Multilevel Comparison of Large Urban Systems ». In : *Cybergeo : European Journal of Geography*. DOI : 10.4000/cybergeo.26730.
- PUMAIN, Denise et al. (2017a). « Chapter 4 - An Incremental Multi-Modelling Method to Simulate Systems of Cities' Evolution ». In : PUMAIN, Denise et Romain REUILLOU. *Urban Dynamics and Simulation Models*. Lecture Notes in Morphogenesis. Springer International Publishing, p. 57-80. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01891927>.
- PUMAIN, Denise et al. (2017b). « Convergences Disciplinaires Sur Le Concept de Transition ». In : *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles. Perspectives Villes et Territoires*. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 33-53. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10515>.
- RAASVELDT, Mark et Hannes MÜHLEISEN (2018). « MonetDBLite : An Embedded Analytical Database ». In : *Proceedings of the 2018 International Conference on Management of Data*. SIGMOD '18. New York, NY, USA : ACM, p. 1837-1838. DOI : 10/gfw9mm. URL : <http://arxiv.org/abs/1805.08520>.
- REUILLOU, Romain, Mathieu LECLAIRE et Sébastien REY-COYREHOURCQ (2013). « OpenMOLE, a Workflow Engine Specifically Tailored for the Distributed Exploration of Simulation Models ». In : *Future Generation Computer Systems*

- 29.8, p. 1981-1990. DOI : 10.1016/j.future.2013.05.003. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13001027>.
- REUILLOU, Romain et al. (2015). « A New Method to Evaluate Simulation Models : The Calibration Profile (CP) Algorithm ». In : *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 18.1, p. 12. DOI : 10/gf9f5x. URL : <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/1/12.html>.
- REY-COYREHOURCQ, Sébastien (2015). « Une plateforme intégrée pour la construction et l'évaluation de modèles de simulation en géographie ». Thèse de doctorat en Géographie. Paris : Université Paris I - Panthéon-Sorbonne.
- REYNOLDS, Craig W. (1987). « Flocks, Herds and Schools : A Distributed Behavioral Model ». In : *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '87. 10133. New York, NY, USA : ACM, p. 25-34. DOI : 10/chhdjr. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/37401.37406>.
- RIBECCA, Severino (2018). *Chart Combinations : Tile Grid Maps*. URL : <http://datavizcatalogue.com/blog/chart-combinations-tile-grid-maps/>.
- RIVARD, Kurt et Doug COGSWELL (2004). « Are You Drowning in BI Reports ? Using Analytical Dashboards to Cut through the Clutter ». In : *DM Review*, <http://goo.gl/hle9Wc>. 00000.
- ROBERT, Paul, Josette REY-DEBOVE et Alain REY (1993). *Le Nouveau Petit Robert*. le Robert.
- RODIER, Xavier et Laure SALIGNY (2010). « Modélisation des objets historiques selon la fonction, l'espace et le temps pour l'étude des dynamiques urbaines dans la longue durée ». In : *Cybergeo : European Journal of Geography*. DOI : 10/bn4kbx. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/23175>.
- ROOT, Christopher et Todd MOSTAK (2016). « MapD : A GPU-Powered Big Data Analytics and Visualization Platform ». In : *ACM SIGGRAPH 2016 Talks*. SIGGRAPH '16. New York, NY, USA : ACM, 73 :1-73 :2. DOI : 10/gd7hg8. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2897839.2927468>.
- ROTH, Robert E. (2013). « Interactive Maps : What We Know and What We Need to Know ». In : *Journal of Spatial Information Science* 6. 00099. DOI : 10/gfw9mq. URL : <http://www.josis.org/index.php/josis/article/view/105>.
- (2015). « Interactivity and Cartography : A Contemporary Perspective on User Interface and User Experience Design from Geospatial Professionals ». In : *Cartographica : The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*. 00016. DOI : 10/gfw9mp. URL : <https://www.utpjournals.press/doi/abs/10.3138/cart.50.2.2427>.
- ROUMPANI, F., O. O'BRIEN et A. HUDSON-SMITH (2013). « Creating, Visualizing and Modelling the Realtime City ». In : *Proceedings of Hybrid City II 'Subtle rEvolutions' Conference*. 00002.
- SANDERS, Lena, éd. (2017). *Peupler la terre : De la préhistoire à l'ère des métropoles*. Avec la coll. de Sander VAN DER LEEUW. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais. 528 p.
- SANDERS, Lena et al. (2018). « Points de Vue Ontologiques Sur Les Transitions Des Systèmes de Peuplement ». In : *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universi-

- taires François-Rabelais, p. 435-459. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10656>.
- SARGENT, Robert G. (1979). « Validation of Simulation Models ». In : *Proceedings of the 11th WSC - Volume 2*. Winter Simulation Conference. WSC '79. Piscataway, NJ, USA : IEEE Press, p. 497-503. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=800134.804379>.
- (2009). « Verification and Validation of Simulation Models ». In : *Proceedings of the 2009 WSC*. Winter Simulation Conference. IEEE, p. 162-176.
- SARGENT, Robert G. et O. BALCI (2017). « History of Verification and Validation of Simulation Models ». In : *Proceedings of the 2017 WSC*. Winter Simulation Conference, p. 292-307. DOI : [10/gfw9pf](https://doi.org/10/gfw9pf).
- SCHELLING, Thomas C. (1971). « Dynamic Models of Segregation ». In : *Journal of mathematical sociology* 1.2. 04241, p. 143-186.
- SCHMITT, Clara (2014). « Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement : de SimpopLocal à SimpopNet. » Thèse de Doctorat. paris : Université Paris I - Panthéon-Sorbonne. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01077891/document>.
- SCHMITT, Clara et al. (2015). « Half a Billion Simulations : Evolutionary Algorithms and Distributed Computing for Calibrating the SimpopLocal Geographical Model ». In : *Environment and Planning B : Planning and Design* advance online publication. DOI : [10.1068/b130064p](https://doi.org/10.1068/b130064p). URL : <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/b130064p>.
- SHAW, William (2017). « Elevated Urinary Glyphosate and Clostridia Metabolites With Altered Dopamine Metabolism in Triplets With Autistic Spectrum Disorder or Suspected Seizure Disorder : A Case Study ». In : *Integrative Medicine : A Clinician's Journal* 16.1, p. 50-57. pmid : 28223908. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5312745/>.
- SHNEIDERMAN, Ben (1996). « The Eyes Have It : A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualizations ». In : *Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages*. IEEE, p. 336-343. DOI : [10/fwdq26](https://doi.org/10/fwdq26).
- Snowflake Schema* (2018). In : *Wikipedia*. Page Version ID : 856363739. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Snowflake_schema&oldid=856363739.
- Star Schema* (2018). In : *Wikipedia*. Page Version ID : 853084099. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Star_schema&oldid=853084099.
- STEWART, John Q (1948). « Demographic Gravitation : Evidence and Applications ». In : *Sociometry* 11.1/2, p. 31-58. DOI : [10.2307/2785468](https://doi.org/10.2307/2785468).
- TAILLANDIER, Patrick et al. (2018). « Building, Composing and Experimenting Complex Spatial Models with the GAMA Platform ». In : *GeoInformatica*. DOI : [10/gfw9nz](https://doi.org/10.1007/s10707-018-00339-6). URL : <https://doi.org/10.1007/s10707-018-00339-6>.
- TANNIER, Cécile (2006). « Sharing and Disseminating Knowledge of Advanced Spatial Modeling. Presentation of an Action Carried out by the European Research Group S4 (Spatial Simulation for Social Sciences) ». In : *International Conference of Territorial Intelligence*. Alba Iulia, Romania, p. 8. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01003259>.
- (2017). « Analyse et Simulation de La Concentration et de La Dispersion Des Implantations Humaines de l'échelle Micro-Locale à l'échelle Régionale.

- Modèles Multi-Échelles et Trans-Échelles ». Habilitation à diriger des recherches. Besançon : Université Bourgogne Franche-Comté. 197 p. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01668615>.
- TANNIER, Cécile et al. (2014). « Une Ontologie Pour Décrire Les Transformations Du Système de Peuplement Européen Entre 800 et 1100 ». In : *Ontologies et Modélisation Par SMA En SHS*. Sous la dir. de Denis PHAN. Hermès - Lavoisier, p. 289-310. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01021976>.
- THIELE, Jan C., Winfried KURTH et Volker GRIMM (2014). « Facilitating Parameter Estimation and Sensitivity Analysis of Agent-Based Models : A Cookbook Using NetLogo and R ». In : *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 17.3, p. 11.
- THOMAS, Steven (2012). *Revisiting the Iterative Incremental Mona Lisa*. URL : <http://itsadeliverything.com/revisiting-the-iterative-incremental-mona-lisa>.
- TOUBERT, Pierre (1973). *Les Structures Du Latium Médiéval : Le Latium Méri-dional et La Sabine Du IXe Siècle à La Fin Du XIIe Siècle*. École française de Rome.
- TREUIL, Jean-Pierre, Alexis DROGOUL et Jean-Daniel ZUCKER (2008). « Modélisation et Simulation à Base d'agents ». In : *Dunod Editions*, p. 1-13.
- TUFTE, Edward R. (2001). *The Visual Display of Quantitative Information*. 2nd edition. 11580. Cheshire, Conn : Graphics Press USA. 190 p.
- TUKEY, John Wilder (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Series in Behavioral Science. Reading, Mass : Addison-Wesley Pub. Co. 688 p.
- (1986). « Statistical and Quantitative Methodology ». In : JONES, L. V. *The Collected Works of John W. Tukey : Philosophy and Principles of Data Analysis 1949-1964*. T. III. CRC Press, p. 143-183. Google Books : JuQD42kUxzIC.
- VERHULST, Pierre-François (1838). « Notice Sur La Loi Que La Population Suit Dans Son Accroissement. Correspondance Mathématique et Physique Publiée Par a ». In : *Quetelet* 10, p. 113-121.
- VERMEIJ, Maarten et al. (2008). « MonetDB, a Novel Spatial Columnstore Dbms ». In : *Academic Proceedings of the 2008 Free and Open Source for Geospatial (FOSS4G) Conference, OSGeo*. 00015, p. 193-199.
- VICTOR, Bret (2009). *Simulation as a Practical Tool*. URL : <http://worrydream.com/#!/SimulationAsAPracticalTool>.
- VOGT, W Paul (1993). « Dictionary of Statistics and Methodology : A Nontechnical Guide for the Social Sciences. » In :
- WARE, Colin (2012). *Information Visualization : Perception for Design*. 05270. Elsevier.
- WHITE, Roger et Guy ENGELEN (2000). « High-Resolution Integrated Modelling of the Spatial Dynamics of Urban and Regional Systems ». In : *Computers, Environment and Urban Systems* 24.5, p. 383-400. DOI : 10.1016/S0198-9715(00)00012-0. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971500000120>.
- WHITE, Roger, Guy ENGELEN et Inge ULJEE (1997). « The Use of Constrained Cellular Automata for High-Resolution Modelling of Urban Land-Use Dynamics ». In : *Environment and Planning B : Planning and Design* 24.3, p. 323-343.

- DOI : 10.1068/b240323. URL : <http://epb.sagepub.com/lookup/doi/10.1068/b240323>.
- WICKHAM, Hadley (2016). *Ggplot2 : Elegant Graphics for Data Analysis*. 00082. Springer.
- (2017). « Tidyverse : Easily Install and Load 'tidyverse' Packages ». In : *R package version 1.1*. 00113.
- WICKHAM, Hadley et al. (2015). « Dplyr : A Grammar of Data Manipulation ». In : *R package version 0.4.3*. 00547.
- WILKINSON, Leland (2006). *The Grammar of Graphics*. 01037. Springer Science & Business Media.
- ZAAMOUNE, Mehdi et al. (2013). « A New Relational Spatial OLAP Approach for Multi-Resolution and Spatio-Multidimensional Analysis of Incomplete Field Data ». In : *ICEIS 2013 INSTICC International Conference on Enterprise Information Systems*. 00010, p.
- ZADORA-RIO, Elisabeth, éd. (2008). *Des paroisses de Touraine aux communes d'Indre-et-Loire : la formation des territoires*. T. 34e Supplément. Revue archéologique du Centre de la France. 34e Supplément à la Revue Archéologique du Centre de la France, Tours. Tours : Ferac Editions. 302 p. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00378136>.
- ZENG, Kai, Sameer AGARWAL et Ion STOICA (2016). « iOLAP : Managing Uncertainty for Efficient Incremental OLAP ». In : *Proceedings of the 2016 International Conference on Management of Data*. SIGMOD '16. 00012. New York, NY, USA : ACM, p. 1347-1361. DOI : 10/gfw9mn. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2882903.2915240>.
- ZHANG, Junfu (2011). « Tipping and Residential Segregation : A Unified Schelling Model ». In : *Journal of Regional Science* 51.1, p. 167-193. DOI : 10/fqc4mz. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-9787.2010.00671.x>.
- ZHENG, Jiaqi (2019). « Interactive Visual Analytics for Agent-Based Simulation : Street-Crossing Behavior at Signalized Pedestrian Crossing ». Mémoire. Helsinki, Finland : Aalto University. 50 p. URL : <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/40790>.
- ÇÖLTEKİN, Arzu, Halldór JANETZKO et Sara FABRIKANT (2018). « Geovisualization ». In : *Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge* 2018.Q2. DOI : 10.22224/gistbok/2018.2.6. URL : <https://gistbok.ucgis.org/bok-topics/geovisualization>.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Modélisation et visualisation à l'interface entre les disciplines	10
Introduction	11
1.1 D'où je viens	11
1.1.1 Géographie	11
1.1.2 Géomatique	12
1.1.3 Modélisation : à la confluence de la GTQ et de la géomati- que	14
1.2 Contexte d'inscription du travail	17
1.2.1 Modélisation de processus spatiaux	17
1.2.2 Des processus inscrits dans la longue durée	19
1.2.3 Un contexte fortement interdisciplinaire	21
1.3 Questionnement initial, obstacles et pistes de résolution	25
1.3.1 Accompagner la modélisation	26
1.3.2 Explorer et confronter données empiriques et simulées . .	28
1.3.3 D'un méta-modèle à un retour sur expérience de modéli- sation	29
1.4 Un positionnement résolument interdisciplinaire, facilité par la conception d'interfaces exploratoires	30
1.4.1 Favoriser une co-construction interdisciplinaire	30
1.4.2 Mettre en place des interfaces disciplinaires	33

1.4.3	Démarche exploratoire	36
1.4.4	Démarche reproductible	38
	Conclusion	38
2	Formaliser connaissances et hypothèses, vers un modèle de simulation co-construit : SimFeodal	39
	<i>Avant-propos</i>	40
	Introduction	42
2.1	Objectifs du modèle SimFeodal – <i>Purpose</i>	43
2.1.1	Contexte historiographique	43
2.1.2	Questionnement	45
2.2	Entités et échelles – <i>Entities, state variables, and scales</i>	46
2.2.1	Entités	46
2.2.2	Échelles spatiales et temporelles	50
2.3	Fonctionnement général – <i>Process overview and scheduling</i>	53
2.3.1	Initialisation	54
2.3.2	Variables globales	55
2.3.3	Renouvellement des foyers paysans	55
2.3.4	Mise à jour du maillage paroissial	56
2.3.5	Détection des Pôles	58
2.3.6	Satisfaction des Foyers Paysans	58
2.3.7	Migration des Foyers Paysans	60
2.3.8	Gains de droits	61
2.3.9	Collecte des droits	61
2.3.10	Dons entre seigneurs	62
2.3.11	Construction et promotion des châteaux	63
2.3.12	Création de nouveaux seigneurs	65
2.3.13	Détection des agrégats	65
2.3.14	Actualisation des pôles	66
2.3.15	Enregistrement des <i>outputs</i>	67
2.4	Concepts de modélisation– <i>Design concepts</i>	67

2.4.1	Principes de base - <i>Basic principles</i>	67
2.4.2	Théories et concepts de la modélisation agents mobilisés	70
2.5	Situation initiale – <i>Details - Initialisation</i>	74
2.5.1	Une situation initiale théorique et générée de manière endogène	74
2.5.2	Paramètres d'initialisation	76
2.6	Données en entrée – <i>Input data</i>	78
2.7	Mécanismes spécifiques – <i>Submodels</i>	78
2.7.1	Introduction	78
2.7.2	Mécanismes globaux	81
2.7.3	Foyers paysans	85
2.7.4	Seigneurs	89
Conclusion		93
3	Évaluer et paramétrier un modèle de simulation complexe en situation d'inter-disciplinarité	95
Introduction		97
3.1	Comment évaluer un modèle ?	98
3.1.1	Évaluation, validation, vérification...	99
3.1.2	Les étapes de l'évaluation d'un modèle	102
3.1.3	Une évaluation de la plausibilité d'un modèle : la « <i>face validation</i> »	107
3.1.4	Vers une évaluation visuelle	114
3.2	Une grille d'analyse composée d'indicateurs de sortie	118
3.2.1	Indices et indicateurs	118
3.2.2	Hiérarchiser et catégoriser les indicateurs	124
3.2.3	Les indicateurs et dimensions de SimFeodal	128
3.3	Paramétrage du modèle SimFeodal	136
3.3.1	Les paramètres	137
3.3.2	Le paramétrage	148
Conclusion		164
5	Explorer visuellement des données de simulation massives pour	

analyser le comportement d'un modèle.	166
Introduction	167
5.1 Capter les sorties de SimFeodal	168
5.1.1 Masse des données	168
5.1.2 Tenir compte de la stochasticité du modèle - les réplications	172
5.1.3 Des réplications aux expériences	174
5.1.4 Des données aux indicateurs	175
5.2 Comment explorer les sorties de SimFeodal ?	177
5.2.1 Observer les simulations en direct ou <i>a posteriori</i>	177
5.2.2 Générer les indicateurs	181
5.2.3 Organiser les indicateurs en rapports paramétrables	183
5.2.4 Organiser les rapports : les <i>dashboards</i>	188
5.2.5 Interagir avec les rapports : exploration interactive	192
5.2.6 Explorer en comparant : la plateforme SimEDB	197
5.3 Organiser les données	200
5.3.1 Assurer la capacité d'interrogation des données	200
5.3.2 Structuration des données de SimFeodal	214
5.4 Une plate-forme d'exploration de données de simulations : SimEDB	222
5.4.1 Contraintes	222
5.4.2 Construire une plate-forme interactive pour l'exploration de sorties de simulation	232
Conclusion	248
6 Exploration du comportement de SimFeodal	249
Introduction	251
6.1 Calibrage du modèle et premiers résultats	252
6.1.1 Calibrage du modèle	252
6.1.2 Résultats des simulations	261
6.1.3 Après le calibrage, comment affiner le modèle ?	274
6.2 Analyser la sensibilité de SimFeodal	277
6.2.1 Méthodologie - Analyse visuelle de sensibilité.	278

6.2.2 Sélection des paramètres à analyser.	288
6.2.3 Évaluation visuelle de la sensibilité	293
6.2.4 Analyser la sensibilité à l'aléa	304
6.2.5 Quels apports de l'analyse visuelle de sensibilité?	308
Conclusion	309
7 Retours sur la co-construction et l'exploration d'un modèle en situation d'inter-disciplinarité	311
Introduction	312
7.1 L'analyse exploratoire de données issues de simulation, une approche aux possibilités multiples	313
7.1.1 L'analyse exploratoire de données, un cadre théorique et méthodologique adapté à l'exploration de toutes données spatiales et spatio-temporelles	313
7.1.2 Construction de connaissance par l'exploration visuelle d'un modèle	317
7.1.3 Comment passer de l'exploration à la validation ? Quelques perspectives	320
7.2 Retours sur la co-construction et l'évaluation collective d'un modèle	326
7.2.1 Co-construction d'un modèle complexe : un retour d'expérience critique	326
7.2.2 Un modèle exploratoire, descriptif, générique, parsimonieux?	326
7.2.3 Construire et utiliser un modèle, deux approches et positions différentes	326
Conclusion	326
Conclusion générale	327

Table des figures

1.1 Le « champignon informationnel », d'après KAPLAN (2013).	20
1.2 « L'ontologie comme médiateur d'un dialogue » de PHAN (2014)	34
2.1 Interactions des agents : seigneurs et foyers paysans.	46
2.2 Constitution des pôles d'attraction et des paroisses.	48
2.3 Héritages et compositions des agents de SimFeodal.	48
2.4 L'espace support de SimFeodal, un monde théorique.	51
2.5 Frise chronologique des processus historiques observés en Tou- raine implémentés dans SimFeodal.	53
2.6 Ordonnancement des mécanismes de SimFeodal.	54
2.7 Étapes successives de l'initialisation des foyers paysans agrégés (petites villes et villages).	76
2.8 Détection des agrégats et identification de leur « héritage ».	82
2.9 Les étapes du mécanisme de détection et de calcul d'attractivité des pôles.	83
2.10 Quatre exemples de paroisses insatisfaites.	84
2.11 Promotion d'églises paroissiales avec églises non paroissiales.	84
2.12 Promotion et création d'églises paroissiales sans églises non pa- roissiales.	85
2.13 Variation de la satisfaction en fonction de la distance à l'atrac- teur le plus proche.	86
2.14 Migrations locales et lointaines.	88
2.15 Décision de migration.	89
2.16 Décision de migration des foyers paysans dépendants.	89

2.17	Prélèvement des droits fonciers par les petits et grands seigneurs.	90
2.18	Mécanisme général de prélèvement des droits par les seigneurs..	91
2.19	Mécanisme de localisation des châteaux construits.	92
3.1	Représentation schématique du cycle de modélisation et de la typologie des termes relatifs à l'évaluation de modèle.	100
3.2	« Sketch of a general procedure for validating an agent-based simulation ».	102
3.3	« General validation process of an ABM ».	102
3.4	Relation entre autisme et utilisation de glyphosate.	108
3.5	Relation entre autisme et vente d'aliments « bio ».	108
3.6	Part des étapes de la cycle de vie d'un modèle pour lesquelles différentes méthodes de « VV&T » peuvent être mobilisées.	114
3.7	Schéma de synthèse des correspondances entre mesures empiriques et simulées.	119
3.8	Les variables d'un modèle de simulation selon BALCI	142
3.9	Les entrées : variables et paramètres.	143
3.10	Les sorties : variables et indicateurs.	144
3.11	Organisation des entrées et sorties du modèle.	145
3.12	Variation des paramètres entre les expériences.	146
3.13	Étapes du processus de modélisation.	150
3.14	Temporalité du paramétrage du modèle.	156
3.15	Une exploration visuelle du rythme des changements de Sim-Feodal.	162
5.1	Indicateurs intégrés à l'interface graphique interne de SimFeodal.	180
5.2	Visualisation intégrée à l'interface graphique interne de SimFeodal.	181
5.3	Un exemple de rapport automatique généré pour SimFeodal.	184
5.4	Un exemple de représentations visuelles courantes dans les <i>dashboards</i>	190
5.5	Première interface de SimVADB, un <i>dashboard</i> dédié à la visualisation des indicateurs de sorties de simulation de SimFeodal.	191
5.6	Construction d'un graphique en coordonnées parallèles et sélection interactive.	195

5.7 SimVADB, un <i>dashboard</i> d'exploration visuelle des indicateurs de sortie de simulation de SimFeodal	196
5.8 SimEDB	199
5.9 Comparaison de la performance de différents SGBD sur un jeu de données test de 100 millions de lignes.	211
5.10 Impact du temps de chargement d'un site web sur sa consultation.	213
5.11 Modèle Conceptuel de Données (MCD) des données en sortie de simulation de SimFeodal telles qu'implémentées dans SimEDB. .	217
5.12 De la sélection interactive à l'indicateur de sortie.	220
5.13 « <i>An update to Cartography³, 10 years after its conception</i> ».	223
5.14 Positionnement de SimEDB dans le cube <i>Cartography³</i> de MA-CEACHREN.	224
5.15 « <i>Interface complexity versus user motivation</i> ».	224
5.16 Un exemple de manipulation de données stockées dans un SGBD depuis R.	236
5.17 Les éléments de grammaire de ggplot2.	236
5.18 Un exemple de production de graphique avec ggplot2.	237
5.19 « <i>The Visualisation Pipeline</i> ».	238
5.20 Le « pipeline » de visualisation et son implémentation dans SimEDB.	239
5.21 Une conception modulaire.	240
5.22 Comparaison visuelle de SimVADB et SimEDB.	241
5.23 La barre de contrôleurs dans l'interface de SimEDB.	242
5.24 Le menu de sélection des expériences.	245
5.25 Utilisation interactive de SimEDB et redimensionnement du panneau de contrôle.	246
6.1 Influence du paramètre nb_tirages sur le nombre de châteaux. . .	258
6.2 Évolution du nombre de châteaux simulé par le modèle calibré. .	259
6.3 Détail de la composition des châteaux en fin de simulation à l'issu du calibrage de SimFeodal.	260
6.4 Concentration des foyers paysans.	263
6.5 Nombre d'agrégats.	263
6.6 Nombre de pôles et part des agrégats comprenant un pôle. . .	264

6.7 Dispersion spatiales des agrégats et pôles.	265
6.8 Hiérarchie des agrégats	266
6.9 Hiérarchie des pôles.	266
6.10 Organisation hiérarchique des paroisses.	267
6.11 Détail de la distribution hiérarchique des paroisses.	268
6.12 Migration des foyers paysans.	269
6.13 Satisfaction des foyers paysans.	270
6.14 Types de migration des foyers paysans.	270
6.15 Nombre de paroisses.	271
6.16 Indicateurs du maillage paroissial.	272
6.17 Couverture de la desserte paroissiale.	273
6.18 Construction et mise en page de planches graphiques dédiées à l'analyse visuelle de la sensibilité.	287
6.19 Analyse de la sensibilité d'ensemble de tous les paramètres de SimFeodal.	288
6.20 Partie de l'interface de SimEDB dédiée à l'exploration visuelle des résultats de l'analyse de sensibilité de SimFeodal.	291
6.21 Sensibilité à la taille du monde simulé.	293
6.22 Sensibilité du paramètre dist_minmax_eglise.	294
6.23 Sensibilité du paramètre rayon_migration_locale_fp.	295
6.24 Sensibilité du paramètre croissance_demo.	295
6.25 Nombre et organisation des agrégats dans le scénario D2.	298
6.26 Sensibilité des paramètres liés aux agrégats.	299
6.27 Sensibilité des paramètres liés aux seigneurs.	300
6.28 Sensibilité du paramètre periode_promotion_chateaux.	302
6.29 Sensibilité du paramètre nb_tirages_chateaux_ps.	302
6.30 Sensibilité du paramètre debut_construction_chateaux.	302
6.31 Sensibilité du paramètre de pondération de création de nouvelles paroisses dans les agrégats.	304
6.32 Sensibilité à l'aléa selon les indicateurs.	306
6.33 Paramètres présentant des sensibilités atypiques à l'aléa.	307
7.1 Obstacles à l'agrégation de données pour la visualisation.	317

7.2	Itérations entre modèles et visualisations pour enrichir les connaissances.	320
7.3	Trois approches de modélisation différentes de processus sociaux et spatiaux sur le temps long.	322

Liste des tableaux

1.1	Les 12 cas d'étude, ou « transitions », du projet TransMonDyn. . .	18
2.1	Les éléments du protocole ODD.	41
2.2	Les différents types d'agents de SimFeodal.	49
2.3	Paramètres permettant de contrôler l'initialisation du monde de SimFeodal.	77
2.4	Attractivité conférée aux pôles par leurs attracteurs.	83
2.5	Gain de puissance par foyer paysan prélevé.	90
3.1	Historique des versions de SimFeodal.	159
5.1	Multiplication des données et indicateurs selon la hiérarchie des simulations.	168
5.2	Une sélection de différents <i>frameworks</i> dédiés à la création d'interfaces d'exploration de données.	234
6.1	Valeurs des indicateurs numériques en fin de simulation.	262
6.2	Les indicateurs de sortie de simulation quantitatifs de SimFeodal	283
6.3	Paramètres sélectionnés pour l'analyse visuelle.	292
6.4	Valeurs des indicateurs numériques du scénario D2 en fin de simulation.	297
6.5	Mesures de dispersion des indicateurs de sortie de SimFeodal. . .	305

7.1 Caractérisation des données intermédiaires dans le spectre des données	315
--	-----

Liste des encadrés

2.1 Un modèle inscrit dans un vif débat historiographique	44
2.2 Écarts entre présentation et implémentation	79
3.1 Évaluation, validation interne et externe	101
3.2 Incrémentalité des indicateurs	126
3.3 Quatre types de paramètres	147
3.4 Construction, paramétrage et calibrage	151
3.5 Paramétrage du modèle gravitaire	152
3.6 Paramétrage du modèle de ségrégation de Schelling	153
5.1 Construction et utilisation interactive d'un graphique en coordonnées parallèles	194
5.2 Un exemple d'interrogation de la base de données de SimEDB.	220
6.1 Différencier indicateurs contextuels et émergents.	281
6.2 Un scénario thématique pour tester l'hypothèse de croissance démographique	296