

Thèse de Doctorat
pour obtenir le grade de docteur délivré par
l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Discipline : Géographie

Modéliser des systèmes de peuplement en interdisciplinarité.

Co-construction et exploration visuelle d'un modèle de simulation.

présentée et soutenue publiquement par

Robin CURA

le 6 mars 2020

Sous la direction de **Lena SANDERS et Anne RUAS**

Composition du Jury :

Sidonie CHRISTOPHE	Directrice de recherche MTES, UMR LASTIG	Rapporteure
Jean-Daniel FEKETE	Directeur de recherche INRIA, Équipe AVIZ	Examinateur
Didier JOSSELIN	Directeur de recherche CNRS, UMR ESPACE	Rapporteur
Laure NUNINGER	Chargée de recherche CNRS, UMR Chrono-Environnement	Examinaterice
Anne RUAS	Chercheuse ICPEF HDR, IFSTTAR	Co-directrice
Lena SANDERS	Directrice de recherche CNRS, UMR Géographie-cités	Co-directrice
Thomas THÉVENIN	Professeur des universités, Université de Bourgogne	Examinateur

Remerciements

Les premières lignes d'un manuscrit de thèse sont le plus souvent dédiées à des dédicaces, des épigraphes ou encore à des mentions administratives imposées. Je suis ici particulièrement heureux de pouvoir finir l'écriture de ce manuscrit en l'introduisant par l'expression de ma gratitude envers toutes celles et ceux qui ont permis à cette thèse de débuter et de la faire aboutir.

Avant tout, je tiens à remercier celles qui ont encadré ce travail. Lena, tu as su m'accompagner dans la conception, la construction et l'évaluation – interne autant qu'externe – de ce travail, toujours avec une bienveillance sincère, une rigueur aiguë et une compréhension fine de la posture d'encadrement, évolutive, dont j'avais besoin pour que ce travail aboutisse d'une façon heureuse. Pour cette habileté humaine et scientifique, qui ont toutes deux participé à et guidé ma (co-)construction de jeune chercheur, un « incommensurable » merci à toi. Anne, par tes remarques et questions – faussement ingénues – sur l'objectif de la modélisation, de la simulation et, plus globalement sur le lien entre ce que je voulais montrer et la manière de l'appuyer, tu m'as poussé à expliciter mes hypothèses et le sens de mes idées. Pour l'éclaircissement, dans le manuscrit et dans mon esprit, qui en résulte, je te remercie sincèrement.

J'ai la chance et l'honneur d'être évalué par des chercheuses et chercheurs qui m'inspirent chacun à leur manière. Qu'ils le sachent ou non, le travail qu'ils ont accepté de discuter a largement été influencé par la lecture de leurs travaux, l'écoute de leurs présentations, les discussions tenues avec eux ou encore les postures qu'ils adoptent et défendent. Pour tout cela, je tiens à remercier Sidonie Christophe, Jean-Daniel Fekete, Didier Josselin, Laure Nuninger et Thomas Thévenin d'avoir accepté de composer le jury de cette thèse et de se prêter à l'exercice de son évaluation.

Depuis le master et jusqu'à aujourd'hui, en passant par ElementR, TransMonDyn, les formations communes, le GdR MAGIS et enfin cette école « d'été » GéoViz 2018, j'ai toujours pu compter sur ta générosité, tes conseils, ta pédagogie, ton sens du collectif, ta curiosité, ta motivation, et – tu pardonneras à ma sincérité cette expression – ton mentorat. Hélène, merci pour ces années de collaboration – passées et sûrement à venir.

Il me faut maintenant remercier ceux sans qui cette expérience de modélisation collective n'existerait pas, ou n'aurait certainement pas été aussi stimulante. Cécile, merci d'avoir animé ce groupe « transition 8 » pendant toutes ces années, en introduisant sans cesse de nouveaux objectifs pour en assurer la continuité. Merci aussi pour les sessions de travail intensives, à Paris, à Besançon ou à distance, qui ont toujours relancé la co-construction de SimFeodal quand les nombreux autres projets de chacun le laissaient de côté trop longtemps. Merci enfin pour ta simplicité, ta motivation, pour l'écoute dont tu fais preuve vis-à-vis des préoccupations de chacun, et pour ton amitié. Un merci non moindre à Elisabeth Z.-R. et Samuel, qui avez su distiller vos immenses connaissances historico-archéologiques à chaque échange, avec une incroyable patience et une certaine abnégation quand on vous demandait pour la énième fois d'essayer de quantifier des éléments qui ne peuvent l'être. Votre dévouement m'impressionne, de même que votre investissement dans ce projet de longue haleine qui ne constitue pourtant qu'une petite facette de vos recherches. Je tiens enfin à remercier Élisabeth L. et Xavier, pour les débuts de cette aventure et la manière dont ils l'ont marquée. J'espère que les événements futurs autour de SimFeodal constitueront des occasions d'en discuter les évolutions. À toutes et tous, merci pour cette belle dynamique collective et horizontale.

La recherche est bien plus agréable à mes yeux – j'espère que ce travail l'illustre – quand elle est menée de manière collective. Je tiens donc à remercier les nombreuses personnes – qui rendent la concision difficile – avec l'aide desquelles j'ai pu forger mes idées, développer mes connaissances, et découvrir des approches différentes.

En tout premier lieu, mes remerciements vont à Julie et Lucie. Notre petit trio s'est créé au sein de TransMonDyn, a été renforcé par le LabEx, et je ne conçois plus de développer une idée ou un texte sans faire appel à votre avis. Tout au long de ces années de thèse, vous m'avez accompagné dans tous les moments – difficiles et joyeux –, scientifiquement et personnellement, et vos approches sensibles de l'interdisciplinarité m'ont apporté bien plus que je ne pourrais le dire dans ces quelques lignes. Merci de votre exigence intellectuelle commune – et à Lena pour ce « formatage » qu'elle vous (et j'espère nous) a légué –, de votre disponibilité et de votre générosité, en travail comme en amitié, sans faille. Si ces années de thèse, même dans les derniers jours, n'ont jamais été solitaires, c'est avant tout grâce à vous.

Merci à Renaud et Antonine d'avoir accompagné mes premiers pas dans la recherche et de m'avoir encouragé à persister, même quand rien n'allait. Merci à Thomas, Sébastien et Clara de m'avoir fait entrer au labo et de m'avoir continuellement motivé à y prolonger mon séjour. Mes thématiques de recherche vous doivent beaucoup, de même que les approches que je défends et celles dont je m'écarte. Clara s'est lancée dans d'autres aventures, mais Thomas et Sébastien, j'ai hâte de pouvoir désormais initier d'autres travaux avec vous, en confiance et en amitié. Cette arrivée dans l'UMR a aussi été l'occasion de rencontrer Denise et Arnaud. Que ce soit dans le cadre de vos projets de recherche, au milieu d'un couloir, en colloque ou lors d'une collaboration, c'est beaucoup à votre contact que j'ai découvert la géographie quantitative, la modélisation, la simulation, etc. Merci infiniment de votre accessibilité et du plaisir évident et communicatif que vous prenez à former.

Merci aux acteurs des projets auxquels j'ai eu la chance de participer : à Lena, pour TransMonDyn, et à tous les membres de ce formidable projet ; à Denise, pour GeoDiverCity, et aux acteurs du groupe « données » autant que du groupe « simulation » ; aux membres du groupe « Temps long » du LabEx, et en particulier à Nicolas dont je me sens privilégié d'avoir fait la rencontre à cette occasion, et à celles avec qui j'ai travaillé plus étroitement et qui m'ont beaucoup apporté : Marie-Vic et Clara F. Merci au groupe ElementR, au GDR MAGIS et notamment à l'A.P. GéoViz et aux organisateurs de son école : Hélène, Paule-Annick, Marlène et Sidonie.

Merci à ceux qui ont toujours facilité mon parcours administratif et matériel, notamment Sophie, Anaïs, Farouk, Pauline et Pierre au LabEx DynamiTe, et Candice à l'école doctorale. Merci aux « cadres » de l'UMR qui rendent tout si simple pour les autres et concourent à ce que ce laboratoire fonctionne si bien. Martine, Saber, Véronique, Liliane, Stéphanie et Yonathan, vous m'avez rendu d'innombrables services, avec beaucoup de patience, de disponibilité et de bonne humeur : merci !

En près de 9 ans, j'ai eu la chance de rencontrer énormément de personnes formidables, qui toutes ensemble composent un cadre de travail extraordinaire et stimulant, l'UMR Géographie-cités. Merci à ceux qui m'en ont fait découvrir le fonctionnement (Julie V., Antoine, Hélène, Céline, etc.), à ceux qui ont toujours répondu à mes questions, même naïves, au détour du couloir de la rue du Four (Hélène, Antoine, Nadine, Arnaud, Anne B., Sophie, Clarisse, etc.), à ceux qui m'ont fait part de tant de remarques utiles, en réunions d'équipe ou ailleurs (Denise, Éric, Claude, François, etc.). Merci aux doctorants, ingénieurs et jeunes docteurs de l'époque qui m'ont accueilli de manière si conviviale et m'ont poussé à y rester : Thomas, Sébastien, Clara, Guilhain, Hadrien, Marion, Pierre, Stavros, Florent, Julie F.-C., Delphine, Charlène, Dimitra, Antonin, Caroline, Jean-Baptiste, Sylvain, Elfie, Élodie et Laurent. Merci à ceux qui ont découvert le labo en même temps que moi et qui ont constitué un soutien tangible dans ces premiers mois de découverte : Clem, Solène, Zoé, Étienne, Romain, Mathieu, Paul, puis Olivier, Sylvestre, Brenda, Julie et Marion P. Merci aux anciens doctorants de « ma génération » : Lucie, Dorian, Damien, Thibault, avec moi finit ce cycle décidément porté sur les thèses longues ! Merci à tous ces lamibos déjà cités, et à ceux qui ont suivi, pour les nombreuses discussions, rue du Four, en 402 à l'IG, au Coolin, au Bar-à-Stavros, au Relais-Fac (merci Matthieu !), au Tennessee, et maintenant au Front Pop' : Odile, Ryma, Natalia, Eugenia, Juste, Dilruba, Ulysse, Matthieu, Mattia, Julien, Constance, Paul G., Anaïs D., Anne-Cécile, Aurélie, Milan, Justin, Joséphine, Marion A., Clément, Marie, Thomas R., Mathilde, Fanny et tous ceux qui prendront la suite.

Merci à ceux qui ont toujours porté des projets collectifs et rendu l'atmosphère de la rue du Four si vivifiante : Hélène, Hadri, Thomas, Marion, Seb, Clem, Solène, Brenda, Julie, Lucie. Et à ceux qui le reproduisent sur notre nouveau Campus : Anne-Cécile et Matthieu, les « chefs-de-Condorcet », Marion A. pour ses quiz, et tous ceux qui y participent. Un merci particulier aux lamibos canal historique tendance guacamole, qui se reconnaîtront, pour toutes les soirées où les rires ont chassé les « rayons de trou noir ». Un grand merci aussi au groupe Bretagne, pour votre support – scientifique, émotionnel, et même logistique ces dernières semaines (merci la coloc !) – et pour votre amitié patiente, même face à mes provocations et à ma mauvaise foi absolue.

Un dernier merci aux collègues qui m'ont aidé à finaliser ce manuscrit, en relisant ces longues pages pour y détecter les coquilles, et corriger des tournures, et débattre de leur contenu. Merci Clémence, Julien, Julie, Thomas, Clémentine, Sébastien, Lucie, Paul C. et Paul G., Thibault, Anne-Cécile, Matthieu, Julie, Lucie et encore Julie et Lucie. Je vous en suis profondément reconnaissant.

Merci aux amis du master, Émeric, Thierry & Gaëlle, Lucie, Mathieu et Sandy, sources inépuisables de chamailleries et de railleries, et dont les visions actuelles de ce que sont effectivement la géomatique et la cartographie constituent toujours un immense bol d'air frais face à certains usages académiques.

Merci aussi aux vieux copains, de plus de 10 ou 15 ans quand ce n'est pas de toujours (Aurel), qui constituent ma famille de cœur aujourd'hui. Pour la branche Mélinée, Brozio, Bubur, Noirot, Miki, Eva, Manon, Ikram et Andy, et pour la branche Rumont (merci pour tout Granny), Pauline, Alex, Lola, Roman, Lucile, H, Robin, Gaspard et Violette. Bienvenue aux derniers arrivants de ces joyeuses tribus, Jim, Léon, Leïla et Marcus. L'avancée de la thèse m'a rendu inversement disponible, mais je compte bien me rattraper de tout ce temps – pas vraiment – perdu.

Merci enfin aux membres de ma famille, actuelle et en cours de co-construction. Pour votre gigantesque et incessant soutien, pour votre veille efficace du baromètre de mon moral, pour vos motivations et votre habileté et efforts à faire en sorte que je n'ai à me soucier que de cette thèse, ces derniers mois mais aussi ces dernières années. Brigitte, Francis, je ne saurai jamais comment vous exprimer ma gratitude, pour tout, et je ne peux qu'espérer que vous en connaissez l'ampleur, tout autant que celle de mon amour. Rémi, Romane, vous avez ouvert la voie, merci de m'avoir sans cesse encouragé, conseillé, et gâté, notamment chez vous où j'ai pu accoucher d'un chapitre difficile. Il me tarde de vous retrouver, à Boston ou ici. Coline, merci pour ta prévenance, ta spontanéité, et ton comique de répétition – même dans les moments difficile – que je partage. J'espère que ton amour des mots me pardonnera les sans doute nombreuses erreurs qui parsèment encore ce manuscrit, ce n'est pas faute d'avoir écouté tes – encore plus nombreuses – règles et d'avoir tenté de les mettre en pratique. Julie, c'est au cours de cette thèse que j'ai eu l'occasion de te rencontrer, de te découvrir, et petit à petit, de t'aimer. Sans ton apport, tes éclairages, ta culture et ta curiosité, cet ouvrage pour lequel tu m'as toujours inspiré et encouragé n'aurait sans doute pas été complet, et ma vie quotidienne ne l'aurait pas non plus été autant. Merci pour ton ouverture, ta sensibilité à fleur de peau, ta « non-geekerie », ta passion et ta douceur qui sont autant de raisons, s'il en fallait vraiment, d'avoir aimé chacun des moments passés à tes côtés sur ce début de temps long.

La réalisation de cette thèse a été rendue possible par plusieurs soutiens financiers.

- Les trois premières années ont été financées par un contrat doctoral du LabEx DynamiTe (ANR-11-LABX-0046) dans le cadre du programme « Investissements d'Avenir », assorti d'une mission d'enseignement à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne effectuée dans l'UFR 08 (Géographie).
- La quatrième année de thèse a été financée par un contrat, à mi-temps, d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER), à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, dans l'UFR 08.
- Les années suivantes ont été accompagnées financièrement par Pôle Emploi, via l'Allocation d'Aide au Retour à l'Emploi, ainsi que par l'exercice d'un emploi à temps partiel (20%) de gestionnaire informatique au sein de la société OZONE.
- Les communications, publications, réunions de travail, etc. réalisées pendant la durée de cette thèse ont été permises grâce au soutien financier de l'UMR 8504 Géographie-cités, du projet ANR TransMonDyn (ANR-10-BLAN-1805) et du projet ERC Advanced Grant GeoDiverCity.

Sommaire

Introduction générale	1
1 Modélisation et visualisation à l'interface entre les disciplines	9
2 Formaliser connaissances et hypothèses, vers un modèle de simulation co-construit : SimFeodal	49
3 Évaluer et paramétrier un modèle de simulation complexe en situation d'interdisciplinarité	107
4 Explorer visuellement des données de simulation massives pour analyser le comportement d'un modèle.	181
5 Exploration du comportement de SimFeodal	263
6 Retours sur la co-construction et l'exploration d'un modèle en situation d'interdisciplinarité	325
Conclusion générale	355
Annexes	362
A Les paramètres de SimFeodal.	362
B Un exemple de rapport automatique des sorties de SimFeodal.	373

Introduction générale

« Modéliser, [...] c'est rechercher quelle composition de modèles rend le mieux compte d'une organisation régionale ou locale, d'une configuration de champ ou de réseau, ou d'une distribution spatiale. [...] Ces modèles ayant un sens défini et connu, représentant un processus, une réponse sociale à des problèmes spatiaux, ils éclairent ce qui est ou ce qui a été en jeu. Tel est le pari central. C'est un pari heuristique. La modélisation est une procédure de recherche. Comme telle, elle appelle des règles de rigueur et de bon usage. La modélisation en géographie commence par deux questions inévitables et associées : où sommes-nous ? qu'est-ce qui a des chances d'être en jeu ? »

Roger BRUNET (2000, p. 28)

« Si un “objet spatial”, (une organisation, une entité), est observable c'est forcément qu'il est apparu et qu'il s'est maintenu suffisamment longtemps pour être considéré comme étudiable par les géographes. En conséquence, expliquer cet objet implique qu'on montre à la fois comment il est né et comment il a persisté. On ne peut donc pas se passer du temps pour faire de la géographie. Mais le temps dont les géographes doivent se servir est complexe. Ils ont à se préoccuper non du passé dans son intégralité, mais des traces de ce passé sensibles dans le monde actuel, donc de “mémoires” ».

François DURAND-DASTÈS (1999, p. 23)

« Principe 1 : Modéliser, c'est apprendre ».

Arnaud BANOS (2013, p. 77)

Le « thème » de cette thèse n'en est pas un, au sens conventionnel. Il est relatif à un enjeu méthodologique : comment modéliser des dynamiques spatio-temporelles sur le temps long ? Les trois citations de l'épigraphhe permettent de décomposer ce questionnement générique. Roger BRUNET aide à définir ce qu'est la modélisation en géographie. Pour François DURAND-DASTÈS, l'explication d'un objet spatial contemporain demande nécessairement de prendre en compte sa dimension temporelle. Enfin, Arnaud BANOS nous rappelle l'un des premiers objectifs de toute procédure de modélisation en sciences humaines et sociales. Ces auteurs, figures majeures de la modélisation

dans la géographie française, nous aident à retrouver le « qu'est-ce » (la définition), le « quoi » (l'« objet spatial » temporel), et le « pourquoi » (le principe heuristique) de telles approches. Les propositions méthodologiques de mise en œuvre de procédures de modélisation sont nombreuses dans la littérature, mais difficiles à appliquer à un contexte interdisciplinaire de modélisation de l'évolution de systèmes de peuplement sur le temps long. L'ambition de ce travail de thèse est de proposer et d'expliquer, dans la continuité des auteurs mis en exergue, un nouveau « comment », c'est-à-dire une méthode de modélisation adaptée à un tel contexte scientifique.

Cette thèse décrit, illustre et met en œuvre une approche de modélisation, vue comme « procédure de recherche » (BRUNET 2000), fondée sur la co-construction interdisciplinaire d'un modèle de simulation. Tout au long de ce manuscrit, nous cherchons à proposer des méthodes accessibles aux chercheurs en sciences humaines et sociales (SHS), c'est-à-dire des méthodes qui ne requièrent pas, en particulier, de connaissances informatiques ou quantitatives avancées. Pour cela, nous nous appuyons sur des formalismes partagés par les disciplines des SHS. Pour la modélisation, il s'agit de l'usage de la simulation à base d'agents qui utilise une analogie anthropomorphique pour décrire les composantes du modèle (les agents), leurs logiques de fonctionnement (les comportements ou « réflexes ») et leurs interactions. Pour analyser, évaluer et guider le développement d'un tel modèle, nous proposons un usage généralisé de la représentation graphique de données. Cette approche graphique est notamment mobilisée dans le cadre d'une proposition de méthode d'évaluation des sorties de modèle, que nous nommons « évaluation visuelle ».

Le cas d'étude sur lequel la démarche prend appui concerne la modélisation des transformations du système de peuplement de l'Europe du Nord-Ouest entre 800 et 1100. Lors de cette période, l'habitat, initialement majoritairement rural et dispersé, est progressivement polarisé par les églises et les châteaux, formant un système de peuplement hiérarchisé, stable, et territorialisé par le maillage paroissial. Ce cas d'étude a profondément orienté la démarche proposée dans la présente thèse, impliquant notamment un travail interdisciplinaire pour rendre compte de ces processus non seulement passés, et qui se sont d'autre part déroulés sur le temps long. Dans la suite de cette introduction, nous présenterons les principaux enjeux que posent un tel cas d'étude.

Étudier les systèmes de peuplement sur le temps long

La citation de DURAND-DASTÈS (1999) rappelle que pour comprendre un « objet spatial », il est nécessaire d'étudier « comment il est né et comment il a persisté ». En nous inscrivant dans la continuité de l'auteur, nous considérons qu'étudier les systèmes de peuplement implique de comprendre les raisons, générales et particulières, de leur état actuel. En effet, l'organisation de tels systèmes dépend largement des successions de transformations qui les ont façonnés tels qu'on les connaît aujourd'hui. Pour les systèmes de peuplement anciens, parmi lesquels celui du Nord-Ouest européen, ces successions de transformations ne peuvent être conçues que dans le temps long. C'est dans cette temporalité que l'on peut observer s'exprimer les transformations sociales successives qui façonnent et transforment l'espace plus ou moins progressivement. Dès lors, pour décrire et comprendre un système de peuplement ancien dans son présent, il

est nécessaire de remonter dans le passé et de saisir les conditions de son émergence.

DURAND-DASTÈS (*ibid.*) ajoute un élément important quant à la manière de mobiliser ce temps long dans le cas des systèmes de peuplement : « [Les géographes] ont à se préoccuper non du passé dans son intégralité, mais des traces de ce passé sensibles dans le monde actuel, donc de “mémoires” ». Pour Durand-Dastès, le géographe s'appuie en effet sur des « traces » persistantes pour étudier les systèmes. Pour comprendre la genèse et les transformations d'un système, on ne peut faire l'économie de mobiliser toutes les sortes de traces, c'est-à-dire de sources qui permettent d'éclairer les états passés de ce système.

De l'étude pluridisciplinaire à l'interdisciplinarité

Les systèmes de peuplements anciens sont généralement accessibles par le biais de sources rares, incomplètes et lacunaires. Pour pouvoir étudier un tel système, il est alors nécessaire de compenser la rareté de chaque source par leur démultiplication, en faisant appel à une large quantité et diversité de sources. Dans le paysage académique français, l'histoire et l'archéologie, disciplines qui étudient toutes deux le passé, sont traditionnellement différenciées par le type de sources qu'elles traitent : l'histoire fonde son analyse sur des sources écrites et l'archéologie sur des sources matérielles. Il est donc intéressant de faire appel conjointement à ces deux disciplines pour multiplier les types de sources analysées afin de maximiser la quantité globale de connaissances expertes fondées sur ces données empiriques.

L'étude d'un système de peuplement ancien et sur le temps long implique alors *a minima* la mise en place de groupes de recherche pluridisciplinaires, composés d'archéologues, d'historiens et de géographes, chacun apportant une expertise dans un type de source ou dans la compréhension des processus qui ont mené aux transformations du système de peuplement. Cette pluridisciplinarité permet la multiplication des points de vue, chacun analysant avec sa culture disciplinaire les éléments du système dont il a une connaissance experte. Au-delà de l'expertise propre de chaque chercheur, c'est aussi la multiplication et la diversité des points de vue qui permet d'embrasser une vision plus globale des processus étudiés.

Il est toutefois difficile de parvenir à cette “vision plus globale” tant les *a priori* disciplinaires sont importants. Ceux-ci peuvent porter sur la manière de définir un objet – la ville des géographes est-elle la même que la ville des archéologues, ou que celle des historiens ? –, mais encore sur un angle spécifique d'explication des processus – interactions spatiales pour les géographes, rôle des institutions et des élites pour les historiens, etc. Pour dépasser la simple juxtaposition des positions disciplinaires et aboutir à une vision renouvelée, originale, de la description ou de l'explication d'un processus spatio-temporel sur le temps long, il est nécessaire de trouver un point d'intersection entre disciplines et de mettre en commun les objets étudiés et leur analyse, en s'emparant de l'ensemble des éléments propres à chacune d'entre elles. En adoptant une telle approche, qui n'est plus simplement pluridisciplinaire mais interdisciplinaire, il est possible de dépasser les positionnements disciplinaires classiques, en faveur d'une analyse collectivement validée, par adhésion, proposant une approche plus complète et générique. L'enjeu est alors d'identifier un objet commun, à l'interface entre les

disciplines, suffisamment spécifique pour que chacun puisse se l'approprier avec son bagage disciplinaire et suffisamment générique pour que sa définition puisse être élaborée collectivement et partagée.

Modélisation

L'élaboration collective et interdisciplinaire d'un tel objet, pour qu'elle soit satisfaisante pour toutes les disciplines impliquées, peut être facilitée par le recours à un mode de description explicite. Il s'agit de formaliser la description de cet objet, permettant d'aboutir à la formulation d'une représentation partagée de l'objet, c'est-à-dire un modèle. L'un des pionniers de l'intelligence artificielle, MINSKY (1965, §2), donne cette définition très générale des modèles : « 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 ». La formalisation d'un modèle, quel qu'en soit le paradigme, permet de répondre à des questions. Dans notre cas, c'est en exprimant, sous la forme d'un modèle formalisé, nos hypothèses thématiques, sur la transformation du système de peuplement Nord-Ouest européen entre 800 et 1100, que nous facilitons la recherche des explications de cette transformation, et surtout, que nous pouvons y attribuer un caractère générique.

Dans un contexte d'interdisciplinarité, le recours à un modèle offre un autre avantage : expliciter le sens exact, ontologique, des entités du modèle et les éventuelles relations qui les mettent en interaction grâce à la formalisation mobilisée dans la construction de ce modèle. En effet, pour que plusieurs chercheurs puissent répondre à la même question sur un système (A) à partir d'un unique modèle (A*), il est indispensable qu'ils s'accordent sur la définition précise du contenu de A*, et donc qu'ils forment un « observateur » collectif cohérent B¹. Pour que des chercheurs, d'origines disciplinaires variées, et ayant différentes approches, puissent parvenir à une représentation commune – un modèle, il est nécessaire qu'ils s'accordent sur sa définition². Il s'agit de choisir les objets à y inclure, de circonscrire la relation de correspondance entre ces objets construits et le monde observable (domaine empirique), et d'harmoniser le sens précis de ce que sont les relations : « qu'est-ce qui a des chances d'être en jeu ? » pour reprendre les mots de BRUNET (2000).

L'exercice de la modélisation – la création d'un modèle – est d'autant plus intéressant qu'il a une forte dimension heuristique. Le premier principe de BANOS (2013), « modéliser, c'est apprendre »³, souligne que quelle que soit la forme choisie⁴, la synthèse des connaissances sous la forme d'un modèle force le chercheur à conceptualiser l'objet de sa recherche et à en repenser le fonctionnement. Pour BRUNET (2000, p.28, §F), la modélisation « construit, déconstruit et reconstruit ; elle passe par une série

1. Pour MINSKY (1965, §2), on ne peut en effet utiliser A* si B n'est pas clairement identifié et compris : « Any attempt to suppress the role of the intentions of the investigator B leads to circular definitions or to ambiguities about "essential features" and the like. »

2. BRUNET (2000, p. 22) explique ainsi que « toute définition d'un objet propose un modèle ».

3. Ce principe deviendra même le titre de la publication correspondant à l'habilitation à diriger les recherches de cet auteur (BANOS 2016).

4. BRUNET (2000, p.27, §D) en identifie trois : « rhétorique », « mathématique » et « iconique » (qu'il préfère au terme graphique, bien plus usité).

d’itérations entre déduction et induction ». C’est au moyen de ces itérations que le modélisateur consolide graduellement ses connaissances des processus et devient capable de les exprimer sous la forme d’un modèle descriptif et explicatif. En contexte interdisciplinaire, l’aspect heuristique de la modélisation est renforcé par la confrontation des connaissances hétérogènes et des points de vue de chacun des membres impliqués dans la modélisation. Le modèle prendra en effet appui sur les connaissances, complémentaires, de chacun. Dès lors, en tant que processus de recherche, la modélisation aboutit indubitablement à un enrichissement des connaissances et des représentations de chacun grâce à celles des autres.

Simulation

Un modèle, comme toute construction scientifique, a vocation à être éprouvé. Pour les modèles portant sur des phénomènes sociaux ou spatiaux contemporains, une telle mise à l’épreuve peut être menée de manière empirique, via des expériences contrôlées « en laboratoire », ou par des observations des phénomènes *in situ*, « sur le terrain ». Dans notre cas, c’est-à-dire celui de la modélisation d’un processus spatial ancien et sur le temps long, il est impossible de mener une telle expérience de manière contrôlée ou même *in situ*. Pour pallier cette impossibilité, la simulation informatique constitue une solution particulièrement intéressante, en ce qu’elle permet de mettre en place un « laboratoire virtuel », autrement dit de mener des expériences *in silico*. En effet, la reformulation computationnelle (algorithmique ou mathématique) du modèle exprimé préalablement offre la possibilité d’en simuler le déroulement et l’aboutissement, et donc d’évaluer le modèle, c’est-à-dire de comparer ses sorties avec les connaissances empiriques du phénomène modélisé.

La simulation permet de tester un modèle, mais aussi d’y ajouter le temps en le dotant d’une dimension temporelle quasi-continue, contrairement à un modèle « rhétorique » ou « iconique »⁵. La simulation est intrinsèquement dynamique et la dimension temporelle peut être observée pendant son déroulement, et ce selon différentes granularités. Avec la simulation, on peut évaluer un état final, mais aussi la succession d’instantanés formés par les états intermédiaires par lesquels passe le système. Un modèle conceptuel permet de détailler les règles de fonctionnement d’un système, lesquelles peuvent mener à une transformation de ce système. Avec un modèle de simulation, on peut directement observer, et donc analyser, ces transformations. Ainsi, il devient possible d’évaluer la capacité d’un modèle à reproduire un état connu, mais aussi de vérifier la cohérence des transformations pendant qu’elles se produisent au regard des connaissances empiriques.

Le choix du paradigme de la simulation multi-agents

La conception d’un modèle « rhétorique » ou « iconique » est relativement accessible à

5. Certains modèles « iconiques » peuvent comporter une dimension temporelle, comme les modèles de « chrono-chorématique » (BOISSAVIT-CAMUS et al. 2005 ; RODIER, GRATALOUP et GUILLOTEAU 2010). La simulation permet de rendre continu le temps discret de ces modèles graphiques, ou de réduire l’intervalle de temps entre les instantanés, c’est-à-dire, dans tous les cas, d’en augmenter la granularité temporelle.

chacun. En effet, les formalismes employés – l’écrit et le visuel – ont une place centrale dans nos sociétés, quand bien même ils reposent aussi sur des apprentissages de construits sociaux partagés. En plus de cela, la construction d’un modèle mathématique ou informatique requiert une culture spécifique. Cela passe notamment par l’apprentissage de différents « langages » et paradigmes, qui peuvent être mathématiques (systèmes d’équations différentielles, formalismes de la théorie des jeux, logique mathématique, etc.) ou informatiques (programmation orientée objet, programmation fonctionnelle, spécificité de chaque langage informatique, etc.). La construction de modèles de simulation demande donc une certaine maîtrise d’un langage informatique et, à ce titre, requiert un coût d’entrée important qui la rend moins accessible que d’autres formes de modélisation. Pour créer un modèle de simulation, il est ainsi nécessaire de disposer des ces compétences mathématiques ou informatiques. Dans le cadre d’un projet collectif, cela implique que tous les participants aient des connaissances méthodologiques générales sur la modélisation, et qu’au moins un des participants possède, en plus, les compétences techniques requises à l’expression dans un langage formel.

Chez les chercheurs en SHS, ces compétences mathématiques et informatiques ne font pas partie d’un socle commun et partagé de connaissances, et notamment chez les archéologues et historiens qui s’intéressent à la modélisation des systèmes de peuplement. Parmi les types formels de modélisation, il nous semble que le paradigme, informatique, de la modélisation à base d’agents, aussi dénommé « simulation multi-agents » (SMA), est plus accessible que les autres. En effet, en SMA, on décrit le fonctionnement d’un système par le biais d’agents informatiques, représentation d’acteurs individuels, collectifs ou institutionnels empiriques. Ces agents interagissent les uns avec les autres au moyen de « règles de comportement » que l’on nomme des mécanismes. Chaque mécanisme est précisément défini par les modélisateurs, mais le résultat des interactions qui en émergent ne peut être déterminé en amont. Le parallèle avec les comportements individuels, rationnels ou non, des acteurs des sociétés passées (paysans, seigneurs, etc.), ou des agrégats d’acteurs (villages, communautés, etc.) permet ainsi d’expliquer le fonctionnement d’un modèle. Ce type de modélisation, par sa nature anthropomorphique, nous semble plus facilement appropriable intellectuellement pour des chercheurs en SHS que des formalismes moins assimilables à des comportements individuels empiriques.

Une modélisation en co-construction

Si le paradigme des SMA est plus accessible aux chercheurs en SHS que d’autres, il demeure un formalisme informatique où l’on exprime les entités sous formes d’objets informatiques dotés de règles, c’est-à-dire de fonctions. L’objectif est que les chercheurs impliqués, de différentes disciplines et de niveaux de connaissances informatiques variés, aient une compréhension du modèle qui soit commune. Cette compréhension ne peut être totalement similaire du fait des arrières plans disciplinaires, mais il s’agit de s’en approcher le plus possible par une explicitation fine. Il faut alors mettre en place une démarche collective et ainsi veiller à ce que chaque participant au projet puisse s’approprier le modèle. Pour cela, nous avons fait le choix de la « co-construction », c’est-à-dire d’une expérience collective où chacun participe à l’élaboration de l’ensemble des composants du modèle, depuis les aspects les plus conceptuels (choix des

entités) jusqu'aux aspects les plus détaillés (ordre d'appel des mécanismes).

Ce faisant, chacun participe à l'ensemble des réflexions et décisions liées au modèle. Toutes les étapes de construction du modèle résultent d'un compromis entre les participants, ce qui permet de dépasser les *a priori* disciplinaires et les « rôles » de chacun dans le collectif. Une telle démarche renforce aussi la dimension heuristique du modèle car chacun doit s'exprimer dans un formalisme commun et partagé : un programme informatique n'interprète pas mais exécute, et ne laisse ainsi pas de part au flou. Pour que le modèle de simulation soit exécutable⁶, il faut une certaine forme d'exhaustivité dans l'explicitation. La mise en œuvre effective d'un processus de co-construction est de ce fait facilitée par l'implémentation informatique d'un modèle. Même sans que cette implémentation soit entièrement collective, c'est-à-dire que chacun participe par exemple à l'écriture des lignes de code du modèle, l'emploi du formalisme informatique forcera chacun à expliciter le détail de l'implémentation.

Des outils pour faciliter la co-construction

Pour guider le développement et l'amélioration du modèle, il est utile de pouvoir en analyser le comportement, c'est-à-dire de procéder à son évaluation. Il s'agit de se demander si le modèle correspond entièrement aux attentes des modélisateurs. L'évaluation de modèles est un domaine de recherche à part entière, souvent fondé sur des analyses formelles, statistiques ou du moins quantifiées des sorties du modèle. Évaluer un modèle selon ces méthodes requiert, d'une part, une certaine expertise thématique sur le phénomène qui est modélisé, et, d'autre part, une bonne connaissance des méthodes d'analyse quantitative des données. Comme la connaissance de la modélisation mathématique ou informatique, ces méthodes quantitatives ne font pas forcément partie de l'outillage méthodologique classique en SHS, et notamment en histoire et en archéologie.

Pour faciliter l'évaluation du modèle, nous proposons dans cette thèse une approche, intitulée « évaluation visuelle », fondée sur l'analyse graphique des sorties du modèle. Cette approche permet à chaque participant du groupe interdisciplinaire d'évaluer, de manière qualitative, les sorties du modèle, y compris quand celles-ci sont massives. L'évaluation visuelle consiste en l'analyse visuelle d'un ensemble d'« indicateurs de sorties » et de représentations graphiques des différentes dynamiques générées par le modèle de simulation. Cette approche rend possible l'exercice d'un regard critique sur ces sorties au regard d'une grille d'analyse explicitée *a priori*. La multiplication et la diversification des indicateurs de sortie permet d'obtenir une évaluation plus fine et complète du modèle et rend accessible l'évaluation de sous-ensembles du modèle (agents, mécanismes). Ce sont donc la couverture globale et la finesse de résolution de l'évaluation qui sont accrues avec cette approche. En facilitant et en fluidifiant l'analyse, globale ou fine, cette méthode ouvre aussi la voie à l'amélioration du modèle, en permettant, dans une démarche faite d'allers-retours, d'isoler rapidement les composantes les moins satisfaisantes du modèle.

Pour rendre ce processus d'évaluation facilement accessible en donnant à chacun la ca-

6. On peut parler de « compilable » en vocabulaire informatique.

pacité d'explorer les sorties du modèle et de juger de leur pertinence, une plateforme interactive, appelée « SIMEDB », a été développée. Celle-ci permet aux membres du projet de visualiser eux-mêmes les sorties du modèle sans avoir à acquérir de compétences spécifiques en analyse et en visualisation de données. En explorant ces sorties graphiques, les chercheurs impliqués peuvent comprendre comment les dynamiques et les structures sociales et spatiales émergent des interactions entre les agents du modèle. Ces chercheurs peuvent ainsi tester des hypothèses thématiques liées au phénomène qu'ils souhaitent étudier avec le modèle. En cela, l'évaluation visuelle au moyen de la plateforme d'exploration favorise une démarche abductive, guidée par les données, et accroît la dimension heuristique du processus de modélisation.

Organisation du manuscrit

Présenter un modèle complexe, sa démarche de construction et son évaluation, dans le cadre d'un manuscrit de thèse, revêt forcément une certaine artificialité dans l'ordre de présentation. Il s'agit de rendre linéaire et chronologique un processus profondément « en spirale », constitué de nombreux allers-retours. De même, la présentation d'un unique état de l'art initial, pour une thèse dont les inscriptions thématiques et méthodologiques sont multiples, n'apparaît pas comme l'option la plus adaptée. Ce manuscrit présente ainsi de nombreux renvois entre chapitres (précédents et suivants), ainsi que des états de l'art propres à chaque chapitre.

Le premier chapitre (chapitre 1) introduit et précise le positionnement adopté dans ce travail. Il s'agit d'expliciter les raisons qui nous ont amené à choisir la simulation multi-agents pour modéliser le phénomène étudié, à construire une plateforme consacrée à la représentation graphique, ainsi qu'à développer une approche de co-construction. Le chapitre 2 présente le modèle « SIMFEODAL » qui est issu de cette approche. Le cadre de conception et d'application y est détaillé selon le protocole de présentation de modèles à base d'agents « ODD » (GRIMM, BERGER et al. 2010). Le chapitre 3 introduit et définit la méthode d'*« évaluation visuelle »*. On y explicite le choix de cette méthode comme méthode d'évaluation et d'exploration du modèle, en la replaçant dans le cadre plus large de l'évaluation des modèles de simulation. Cette évaluation visuelle est ensuite mobilisée pour présenter l'évolution du modèle et le travail de « paramétrage » qui a guidé cette évolution. Dans le chapitre 4, nous présentons la succession de besoins, de contraintes et de choix – thématiques, méthodologiques et techniques – qui a mené à la création de la plateforme interactive d'exploration des sorties du modèle SIMEDB. Les parti-pris de sa conception en matière de stockage de données (bases de données relationnelles analytiques) et d'interactivité sont expliqués dans ce chapitre. En mobilisant cette plateforme, le chapitre 5 expose les résultats du modèle, à savoir les sorties de la version la plus récente de SIMFEODAL, et les critique au regard de la grille d'analyse établie préalablement. Pour prolonger l'exploration du modèle, ce chapitre est aussi l'occasion de mener une analyse de sensibilité exploratoire du modèle, qui reste fondée sur la représentation graphique. Enfin, le chapitre 6 constitue un retour réflexif, à partir de l'expérience relatée tout au long de cette thèse, sur la manipulation de données de simulation et sur l'effectivité de la démarche de co-construction mise en œuvre et relatée tout au long de cette thèse.

Modélisation et visualisation à l'interface entre les disciplines

Sommaire

Introduction	10
1.1 Parcours scientifique et professionnel : vers la modélisation en géographie	11
1.1.1 Une formation de géographe	11
1.1.2 Une approche méthodologique de géomaticien	12
1.1.3 La modélisation comme domaine de confluence entre la géographie quantitative et la géomatique	14
1.2 Modéliser l'espace sur le temps long : un travail d'interdisciplinarité	17
1.2.1 Modélisation de processus spatiaux	17
1.2.2 Appréhender des processus inscrits dans la longue durée	19
1.2.3 Un contexte fortement interdisciplinaire	21
1.3 Conditions et modalités de la modélisation collective et interdisciplinaire	26
1.3.1 Position du modélisateur : du guide au co-constructeur	26
1.3.2 Explorer plutôt que confronter des données empiriques et simulées	29
1.3.3 D'un méta-modèle à un retour sur expérience de modélisation	31
1.4 Programme de recherche : visualiser et explorer pour co-construire un modèle par la conception d'interfaces exploratoires	33
1.4.1 Favoriser une co-construction interdisciplinaire	33
1.4.2 Mettre en place des interfaces disciplinaires	36
1.4.3 S'engager dans une démarche exploratoire	40
1.4.4 Poursuivre une démarche reproductible	42
Conclusion	46

Introduction

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit est hybride, et donc peu évident à positionner dans l'espace des disciplines académiques, tant l'objet décrit (la modélisation de dynamiques spatiales), le cas d'étude (l'évolution du système de peuplement rural en Touraine entre les IX^e et XIII^e siècles) et les méthodes (la simulation multi-agents, l'exploration visuelle de données) et dynamiques (interdisciplinarité et co-construction) mises en place semblent relever de disciplines différentes (géographie, sciences historiques et informatique).

Cet aspect pluridisciplinaire complexifie la structure démonstrative classique d'une thèse en géographie, et j'estime¹ qu'il serait inadapté d'engager cette argumentation par l'habituel état de l'art, celui-ci ne pouvant être cantonné à un unique sujet dans ce travail.

Au contraire, ce premier chapitre offre l'occasion de clarifier, en l'explicitant, la position de ce travail universitaire, et plus globalement, des recherches menées dans le cadre de cette thèse. Ce manuscrit et les productions informatiques qui l'accompagnent² ne visent pas à approfondir un questionnement thématique précis, mais s'ancrent à l'inverse dans une position assumée et engagée de démarche méthodologique. C'est dans ce sens que ce manuscrit doit être compris, en considérant que les solutions mises en œuvre pour l'analyse d'un cas d'étude particulier ont une vocation de généréricité et de reproductibilité. L'apport majeur de ce travail est ainsi méthodologique, et c'est à ce titre qu'il s'inscrit à l'interface entre plusieurs disciplines, mobilisant des connaissances et méthodes de chacune. Dans ce travail de thèse, je défends la position personnelle de passeur entre ces disciplines. L'un de mes apports consiste ainsi à isoler, dans les disciplines et approches identifiées, les éléments conceptuels, méthodologiques et techniques pertinents, de manière à les coordonner en vue de répondre à un sujet de recherche profondément interdisciplinaire.

Dans ce chapitre, j'explicite le positionnement de ce travail méthodologique, à l'interface entre la géographie, l'informatique et les sciences historiques et des approches méthodologiques plurielles. Pour expliciter cette position et l'engagement collectif qui la définit, il est nécessaire d'en décrire la genèse au travers (1) de mon parcours personnel et (2) du contexte de conception de cette thèse. La description (3) du questionnement qui en résulte et de son évolution dans le contexte de ce travail de recherche, permettront enfin (4) de présenter l'approche suivie tout au long de cette expérience, sous une forme programmatique engagée.

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. Ce sera aussi le cas du chapitre 6, consacré à un retour réflexif lui aussi personnel. Dans le reste de ce manuscrit, qui s'inscrit dans un contexte collectif dont plusieurs dimensions sont elles aussi collectives, la première personne du pluriel sera exclusivement mobilisée.

2. La forme numérique de ces productions, organisée dans des dépôts logiciels qui sont systématiquement communiqués dans cette thèse, me paraît plus adaptée qu'une reproduction dans le manuscrit.

1.1 Parcours scientifique et professionnel : vers la modélisation en géographie

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 est important de faire un rapide retour sur ma formation initiale et mon 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'études en modélisation, en passant par une spécialisation en géomatique et cartographie, chacune des étapes de ma formation permet de mieux comprendre la formulation de l'aboutissement de cette thèse fondée sur la co-construction interdisciplinaire de modèles spatiaux et sur leur exploration graphique. Les étapes présentées ici ne constituent pas l'ensemble de mon parcours ou de mes expériences, mais ce sont celles qui me paraissent les plus à même d'expliciter les approches suivies dans la thèse. Pour la même raison, ces étapes sont décrites par le prisme de cette thèse, et on pourrait y voir d'autres explicitations en suivant un autre prisme d'analyse. Ce parcours scientifique et professionnel n'a pas vocation à justifier les choix effectués dans cette thèse, mais à en expliciter les conditions d'émergence.

1.1.1 Une formation de géographe

Ce travail de recherche s'inscrit avant tout, tant conceptuellement que administrativement, dans le champ disciplinaire de la géographie. Cette discipline, consacrée à l'étude de la dimension 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 de ses contextes spatiaux.

Géographie urbaine. Cela m'a mené vers un cursus universitaire classique de géographie, majoritairement marqué par la géographie humaine et l'étude 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'en expliquer les processus spatiaux et sociaux. 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 de l'écart entre leur objectif exprimé et leur action effective.

En master, j'ai voulu appliquer ces approches en initiant, sous la co-direction de Renaud LE GOIX et Antonine RIBARDIÈRE, 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 », constitue ainsi un tournant vers la géographie théorique et quantitative (GTQ). L'approche, très quantifiée, 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 catégories 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 Une approche méthodologique de géomaticien

Pour répondre à ce déficit méthodologique, je me suis orienté, pour le master 2, vers une spécialisation en géomatique et cartographie, en intégrant le master professionnel Carthagéo. Les connaissances acquises, méthodologiques et techniques, ont toutes concouru aux démarches et compétences 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 tra-

tement 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 classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) menées 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, reproductibles et paramétrables.

Dans le cadre d’un projet de programmation en systèmes d’informations géographiques (SIG), j’ai aussi dû réaliser un outil – un *plugin SIG*³ –, 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 (IGN⁴), 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 »⁵ d’un logiciel a été fondatrice pour mes travaux ultérieurs, et structure largement le présent travail de thèse (voir chapitre 4, section 4.4).

Approches géométriques. Une autre approche mobilisée dans cette thèse est la vision processuelle « géométrique » des traitements de données spatiales. Dans ce type d’approches, caractérisées par le recours aux 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 contiguïtés spatiales d’ordre n . De la même manière, pour confondre des maillages différents

3. Les *plugins* sont des extensions logicielles, qui ajoutent des fonctionnalités absentes à des logiciels génériques.

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

5. 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).

(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 ainsi 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 » m'a été fortement recommandée et transmise dans le cadre d'enseignements en analyse spatiale.

Dans le modèle présenté dans cette thèse (chapitre 2), 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 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 faits dans cette 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 La modélisation comme domaine de confluence entre la géographie quantitative et 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 intitulé « Conception de modèles et d'outils de géosimulation » (CURA 2011), était organisé autour de tâches qui résonnent fortement vis-à-vis du contenu de cette thèse.

Il s'agissait, de « prendre part à toutes les étapes de la modélisation » (*ibid.*), par :

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 (*ibid.*, p. 12-13).

Ce stage de six mois, et les deux années de contrats d'ingénieur d'études qui l'ont suivi pour en prolonger les recherches (au sein des projets GeoDiverCity, MIRO2 puis TransMonDyn)⁶ 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 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

6. Respectivement portés par Denise PUMAIN (ERC GeoDiverCity), Arnaud BANOS (ANR MIRO2) et Lena SANDERS (ANR TransMonDyn).

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 en outre 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, SWERTS et al. (2015)).

Accompagnement à la modélisation. Un dernier aspect, influencé par 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, entre modélisateur et 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 méthodologies mobilisées dans un modèle. Il me semble ainsi nécessaire que le modélisateur s'accoutume pleinement au sujet thématique traité, et que le thématicien s'intéresse aux aspects méthodologiques pour être en mesure de comprendre les implications de l'implémentation informatique du modèle.

Ma formation universitaire 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, les choix faits dans cette thèse, qui ont avant tout été réalisé en fonction des besoins, envies et contraintes – tant personnels que collectifs – rencontrés dans la conception et l'exploration de SIMFEODAL. En retracant et ré-organisation ce parcours choisi, j'essaie de contextualiser l'émergence de ce sujet et ainsi d'en éclairer la conception ainsi que mon apport et positionnement personnel dans celle-ci. Cela me paraît important, qui plus est au regard du contexte, toujours collectif, dans lequel cette thèse a été conçue et réalisée,

1.2 Modéliser l'espace sur le temps long : un travail d'interdisciplinarité

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 TransMonDyn⁷. 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 conçus. Il me paraît donc indispensable de préciser les cadres conceptuels et pratiques de ce projet qui ont servi de base aux principaux choix réalisés 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 de l'époque contemporaine –, mais avaient en commun, comme le descriptif du projet⁸ le mentionne, « un “avant” et un “après” radicalement différents du point de vue de l'occupation de l'espace par les sociétés ».

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

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

CHAPITRE 1. MODÉLISATION ET VISUALISATION À L'INTERFACE ENTRE LES DISCIPLINES

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. NUNINGER
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, SANDERS 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 transformations 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 Appréhender 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 chimiques⁹. 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 de ce travail de thèse.

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

Dans cette transition¹⁰, le régime 1, hérité de l'antiquité tardive, est caractérisé par un pouvoir centralisé et un habitat majoritairement dispersé et 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 conjointe dans un passé lointain 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, par 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).

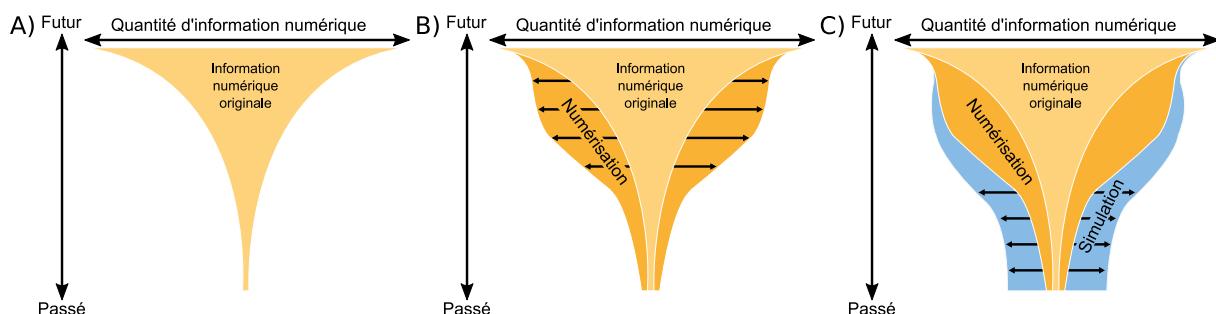


FIGURE 1.1 – Le « champignon informationnel », d'après KAPLAN (2013).

L'exercice de la modélisation demande pourtant une quantité substantielle de données, et surtout que ces données soient homogènes en termes de couverture spatio-temporelle et en termes 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

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

d'experte, est l'apanage des « thématiciens » du projet. Le modélisateur, qui ne peut 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 l'intermédiaire 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, MATHIAN 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 mené jusqu'à son terme. Celle-ci est au cœur d'un projet tel que TransMonDyn, où collaboraient des géographes, archéologues et historiens, informaticiens et géomaticiens, épistémologues, linguistes, mathématiciens... Une expérience précédente, Archaeomedes (ARCHAEOMEDES 1998), avait déjà posé les bases d'une certaine interdisciplinarité entre géographes et archéologues¹¹, 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 disciplines mentionnées, et y compris en archéologie, des chercheurs qui avaient exprimé un désaccord

11. 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.

quant aux approches très empreintes 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, une forte interdisciplinarité entraîne nécessairement 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, c'est-à-dire l'ensemble des éléments sur lesquels les disciplines se constituent, influencent fortement la manière de considérer un thème commun, comme celui de l'étude d'un système de villes par exemple. Les géographes en analysent les interactions et populations au moyen de données de recensement ou d'analyses des comportements des acteurs territoriaux. Les historiens se réfèrent aux sources historiques, le plus souvent issues des élites ou structures dominantes, qui communiquent sans doute des informations précises sur les liens politiques ou religieux entre les villes. Les archéologues cherchent dans les traces matérielles des points communs en termes 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 orientent nécessairement l'approche.

Ces sources et perspectives différentes orientent aussi fortement les ontologies et lexiques utilisés. On a donné l'exemple des villes, mais chaque discipline use de son propre jargon et se dote de concepts spécifiques pour le définir. 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, 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 thématiciens, 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 Trans-

MonDyn, entre « thématiciens » et « modélisateurs ». À 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, TANNIER et al. 2017]). 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, MATHIAN 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 » (*ibid.*, 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. 2017). 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 implantés au travers de systèmes multi-agents, l'hétérogénéité est forte : entre un modèle KISS¹², 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 Dynamite¹³, proposé par le groupe de travail « Systèmes de Peuplement sur le temps long », 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 »¹⁴. Au regard de ces objectifs, on comprendra aisément les similarités avec TransMonDyn, que ce soit en termes d'interdisciplinarité ou de démarche.

12. 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 ».

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

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

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

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 »¹⁶ qui résulte de ce projet, intitulé « Les concepts-clés des systèmes de peuplement sur le temps long » (SANDERS, BRETAGNOLLE et al. 2020), 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 distinctes de celles de TransMonDyn.

16. C'était le nom provisoire, modifié par la suite, de ce projet.

1.3 Du projet de thèse à une question de recherche : les conditions et modalités de la modélisation collective et interdisciplinaire

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 (« Modéliser des systèmes de peuplement en interdisciplinarité. Co-construction et exploration visuelle d'un modèle de simulation »), mais que l'ordre en a été bouleversé, que la logique d'accompagnement a été mise en avant (même si elle était mentionnée 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 »;
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, largement ré-organisées et hiérarchisées différemment. Il s'agit ici de revenir sur les obstacles et solutions rencontrées durant le travail de thèse, qui ont conduit à reformuler et ré-agencer ces trois composantes initiales.

1.3.1 Quelle position pour le modélisateur ? Du guide au co-constructeur

L'ambition d'origine était d'accompagner la modélisation des transitions en « [extraignant] 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 qui était initialement prévue. Il s'agissait ainsi plutôt d'orienter et de diriger les thématiciens vers la conception de modèles plutôt que de le faire avec eux, en m'adaptant aussi à leur point de vue.

Guider la modélisation de cas d'études suivant une approche harmonisée. Dans les faits, en matière d'accompagnement, mon projet de recherche initial visait à formaliser les discours experts des thématiciens en vue de leur modélisation. Cette formalisation devait s'appuyer sur des méthodes graphiques à l'aide de « briques de bases », modèles schématiques d'un type de processus ou d'interaction. Pour que cette

approche soit généralisable à toutes les transitions identifiées dans TransMonDyn, il fallait alors que celles-ci atteignent une certaine homogénéité dans le degré de maturité de leur conceptualisation, et donc que l'ensemble des thématiciens acceptent ce type de modélisation généralisant. Il s'agissait donc de modéliser, à partir des connaissances expertes, et éventuellement des données empiriques disponibles, voire à partir de modèles déjà réalisés par les groupes de travail, chacune des transitions selon un paradigme commun et générique.

D'une part, on le constate à la lecture de l'ouvrage collectif issu du projet TransMonDyn, les modèles ont atteint des niveaux d'avancement très inégaux. D'autre part, ils ont aussi été réalisés selon des paradigmes tout aussi variés dans leur démarche (plutôt KISS ou KIDS, différents niveaux d'agentification, etc., cf. Interdisciplinarité et méthodologie, p. 23). Un type générique de modélisation, même sans aller jusqu'à l'implémentation effective, n'était donc pas applicable à l'ensemble des transitions. Une solution aurait été de sélectionner un sous-ensemble des transitions, homogène en terme d'approche et de progression vis-à-vis de l'implémentation. Là encore, chaque modélisateur ayant une approche propre (voir plus haut), une telle homogénéité était pourtant difficilement identifiable.

En allant plus loin, on peut noter que même dans le cas du projet TransMonDyn où un même modélisateur a collaboré à plusieurs transitions, il a choisi de développer des types de modèles très différents. Alain FRANC, un mathématicien qui a participé aux transitions 9 (OURIACHI, BERTONCELLO et FRANC 2017) et 12 (BRETAGNOLLE et FRANC 2017), voir tableau 1.1, a ainsi choisi d'utiliser la théorie des jeux dans le premier cas, et de réaliser un modèle descriptif statique dans le second. Cet exemple met en exergue l'obstacle qui me paraît désormais majeur dans la conception de modèles différents selon un formalisme et un paradigme harmonisé : le type de modèle est un choix collectif des membres impliqués, mais il n'est pas pour autant réalisé de manière entièrement indépendante. Le questionnement initial, les données disponibles ou encore le parcours personnel des membres impliqués jouent ainsi un rôle considérable dans les choix de modélisation.

En premier lieu, le parcours méthodologique et scientifique de chacun des participants joue un large rôle, chaque modélisateur ayant naturellement tendance à approcher un problème avec les outils qu'il a l'habitude d'utiliser. Un statisticien habitué aux systèmes dynamiques à base d'équations différentielles aura du mal à concevoir un modèle conceptuel en termes d'agents et de mécanismes, et un adepte des modèles à base d'agents très parcimonieux sera sans doute frustré par un choix collectif de modèle descriptif.

En second lieu, il me semble que la combinaison du questionnement initial et la nature des données disponibles conditionne aussi très largement le choix du type de modélisation. Selon que le questionnement repose sur l'observation de dynamiques individuelles ou au contraire agrégées, on se tournera ainsi soit vers des méthodes où l'individu peut être suivi (modèles agents, théorie des jeux, etc.), soit vers des méthodes plus agrégantes (systèmes dynamiques par exemple). Selon que le questionnement porte sur le déroulement des « transitions » ou au contraire sur la caractérisation des « régimes », on choisira aussi différentes méthodes. Au niveau des données empiriques, plus celles-ci

sont nombreuses, plus le type de modélisation pourra être « *data-driven* », produisant peut-être des modèles plus parcimonieux donnant une forte importance à la validation. Au contraire, en présence de peu de données empiriques mais de nombreuses connaissances expertes, des modèles « *theory-driven* » seront sans doute privilégiés, évalués et mobilisés de manière plus qualitative. Dans l'exemple du projet TransMonDyn, le choix de la modélisation agent, basée sur des connaissances expertes et non sur les données, a été un choix collectif décidé dès le début du projet. Ce n'est donc pas la disponibilité des données qui a influencé le type de modélisation, sauf peut-être pour la modélisation de l'une des transitions (BRETAGNOLLE et FRANC 2017), où les nombreuses données disponibles et leur format ont encouragé à la création d'un modèle statistique descriptif.

De la prescription à l'accompagnement. Au-delà de la question de la faisabilité effective d'un tel projet d'accompagnement global à la modélisation d'un ensemble de transitions, rendue difficile dans le contexte très interdisciplinaire et multi-approches de TransMonDyn, la réalisation de cet « accompagnement à la modélisation » posait question en matière de méthode d'accompagnement. Dans un tel contexte, la proposition d'un cadre conceptuel commun et générique de modélisation était-elle la manière la plus adaptée de réellement « accompagner » la modélisation ? Dans un parcours, un accompagnateur peut ainsi être devant, au même niveau, ou derrière ceux qu'ils accompagnent. La position que j'avais initialement prévue me plaçait « devant », c'est-à-dire en guide chargé d'orienter la marche des suivants en proposant un seul itinéraire, c'est-à-dire une approche commune et unique de modélisation. Cela n'a pas été possible pour une raison chronologique triviale – le projet TransMonDyn avait commencé avant le début effectif de cette thèse –, mais aussi vis-à-vis des discussions collectives relatives à la position des modélisateurs, unanimement choisie comme une position d'accompagnement « au même niveau » pour reprendre la métaphore précédente. Cela interroge le positionnement du modélisateur vis-à-vis des thématiciens « avec » lesquels il cherche à concevoir un modèle, et qui voulait, dans TransMonDyn, être celui d'un « accompagnateur » et co-acteur plus que celle d'un prescripteur ou d'un assistant technique.

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 frustrante pour les thématiciens (OURIACHI, MATHIAN et al. 2017, p. 470), il faut avant tout veiller à répondre aux attentes de ces derniers 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 modèle¹⁷ 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

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

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 » (OURIACHI, MATHIAN et al. 2017, p. 484). Un consensus permanent sur la manière de procéder est ainsi nécessaire, sous risque de voir l'expérience échouer avant son terme. Pour que le projet de modélisation interdisciplinaire aboutisse, le modélisateur ne peut être un simple « implémenteur », qui ne participerait qu'à la dernière phase – l'implémentation informatique du modèle conceptuel. 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 rare dans nos métiers. »

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

Ne disposant pas du temps nécessaire, ni pour créer cette intimité avec chaque groupe de travail, ni pour mener la modélisation de plusieurs transitions, j'ai considéré que mieux valait se concentrer sur la modélisation d'une unique transition. C'est ainsi qu'il était possible d'y investir le temps suffisant, plutôt que de chercher à multiplier les expériences de modélisation de plusieurs transitions, ce qui aurait pu être frustrant pour les thématiciens et autres modélisateurs impliqués.

1.3.2 Explorer plutôt que confronter des données empiriques et simulées

La deuxième tâche du projet initial de thèse était de construire une plateforme 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. La structure des données disponibles a entraîné une reformulation de cette ambition.

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/détailler 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'en-

visageais 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.

Dans les faits, et c'est aussi une limite qui n'est visible qu'une fois l'exercice entamé, l'utilisation des données archéologiques est bien plus complexe que je ne pouvais le prévoir en tant que géographe habitué aux sources de données contemporaines, institutionnelles et souvent exhaustives. De nombreuses « données » existent, mais elles ne sont pas forcément harmonisées ou homogènes, et surtout, elles sont très lacunaires sur les dimensions temporelles (des périodes entières ne sont pas couvertes) et spatiales (les données ne couvrent que rarement l'ensemble du territoire étudié). À une exception près, les modèles finalement issus de TransMonDyn sont d'ailleurs tous « *theory-driven* » plutôt que « *data-driven* »¹⁸ : ils reposent sur des connaissances expertes et des hypothèses thématiques plutôt que sur une information quantifiée qui serait directement injectée dans les modèles. Dans la plupart des cas¹⁹, les données en tant que telles ont été mobilisées comme des moyens d'évaluer les modèles plutôt que comme des bases de construction. L'usage des données empiriques, dans ma thèse, s'inscrit pleinement dans cette approche empruntée collectivement par les participants du projet TransMonDyn.

Exploration de modèles et confrontations de données. Pour « explorer les modèles », c'est-à-dire analyser l'étendue des dynamiques simulées et des sorties auxquels ils pouvaient aboutir, et mener ainsi une validation de ces modèles, je comptais mobiliser des méthodes d'exploration automatisée de modèles. Le projet ERC GeoDiverCity²⁰, auquel je contribuais par ailleurs, comportait en effet un axe de recherche sur le développement de telles méthodes. Dans ce cadre, des outils et algorithmes d'exploration automatisée de modèles avait déjà été développés lors de la rédaction de mon projet initial de thèse. Plusieurs thèses issues de ce projet ERC avaient ainsi privilégié ce type d'approches pour explorer les modèles (SCHMITT 2014; COTTINEAU 2014; REY-COYREHOURCQ 2015).

Fondamentalement, le présupposé de telles méthodes (voir chapitre 6, section 6.1.3) 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.

Le contexte effectif de co-construction du modèle a pourtant invalidé, ou au moins freiné, ce type d'approche. Ces méthodes d'exploration automatiques sont en effet pen-

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

19. À l'exception de la transition 9 (cf. tableau 1.1) où les auteurs (BRETAGNOLLE et FRANC 2017) ont justement mené un travail de modélisation « statique » à partir des données disponibles, en modélisant les états successifs des potentialités d'échanges inter-urbains plutôt que de modéliser les causes de leur émergence.

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

sées comme permettant l'exploration de modèles plutôt KISS. Pour mener une exploration complète, il faut minimiser le nombre de paramètres en entrées et le nombre d'indicateurs en sortie. Dans le cas inverse, l'« explosion combinatoire » qui résulte de leurs combinaisons empêche de mener une exploration complète.

La réalisation de modèles KISS demande cependant aux thématiciens de faire preuve d'une forte abstraction quant aux processus et entités modélisés. Dans un contexte de premières expérience de modélisation pour une large part des thématiciens du projet TransMonDyn, cela rendait difficile l'adoption de ce type de modélisation qui demande « un apprentissage, une familiarisation progressive avec un mode de pensée qui n'est pas génétiquement le sien » (GARMY in OURIACHI, MATHIAN et al. 2017, p. 477). Pour des néo-modélisateurs, le choix de modèles KIDS est alors plus aisé, et le travail de « parcimonisation » qu'implique ce type de modèle dans un second temps aide justement à cette « familiarisation progressive ».

Avec des modèles plutôt descriptifs, 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 être que manuelle. À ce titre, la plateforme 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 se passer d'analyses poussées de plusieurs modèles de transitions, formalisés de la même manière et avec des approches homogènes. En d'autres mots, sans avoir « guidé » la modélisation de plusieurs cas d'études, ou sans intervenir complètement après l'achèvement du projet TransMonDyn, une fois que toutes les transitions auraient déjà été modélisées, il était invraisemblable d'aboutir à un tel résultat.

Cet objectif s'avérant peu réalisable au regard du contexte effectif de cette thèse, et au fur et à mesure du travail collectif de modélisation dans lequel je me suis trouvé impliqué, j'ai accordé une importance de plus en plus sensible à l'un des moyens de parvenir au méta-modèle qui avait été identifié dans le projet de thèse initial. Il s'agissait de la « la mise en place d'une démarche facilitant le dialogue et la compréhension interdisciplinaire ». À force de ré-ajustements de ce travail de thèse, c'est en définitive dans cette direction que j'ai dirigé mon travail, en cherchant à concevoir des « interfaces », méthodologiques et techniques, à la modélisation. Ces interfaces, détaillées par la suite (section 1.4.2), ambitionnent d'aider à la modélisation des transitions d'une manière qui soit satisfaisante pour chacun des acteurs impliqués, modélisateurs 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 Programme de recherche : visualiser et explorer pour co-construire un modèle 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 les systèmes de peuplement.

Le contexte de travail, autour du projet TransMonDyn et du groupe de travail « temps long » du LabEx DynamiTe (section 1.2), a détaillé ce thème et en a montré les enjeux. La modélisation des transformations spatiales est un objet de recherche interdisciplinaire, fait 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 le sujet d'ensemble de cette recherche. Depuis la volonté initiale de créer un méta-modèle, il s'agissait désormais de documenter et promouvoir l'approche d'ensemble mise en place tout au long de ce travail collectif et interdisciplinaire.

Dans cette dernière partie, je souhaite préciser et justifier cette approche de modélisation interdisciplinaire qui est (1) résolument inscrite dans la co-construction et (2) s'appuie sur la mise en places d'interfaces disciplinaires (thématisques et méthodologiques) pour faciliter cette co-construction interdisciplinaire. Cette approche est (3) délibérément exploratoire, aussi bien pour la conception du modèle que pour son analyse, tout en visant à (4) assurer une reproductibilité des moyens, méthodologiques et techniques, mis en œuvre.

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 est 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 des 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 modélisateurs y sont d'ailleurs présentés comme des « animateurs »²¹, 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 « modélisateurs » et « thématiciens », mais elle y ajoute une hiérarchie en termes de maîtrise du processus de modélisation dans son ensemble. Dans cette thèse, je défends une approche « démocratique », où le modélisateur 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 », qui peut être modélisateur comme dans la démarche ComMod mais aussi thématicien, 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 d'animatrice, 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 modèles 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 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. Celles-ci sont 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 » (ibid., p. 29).

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

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. Le modélisateur-informaticien est placé 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. Les participants sont ainsi inscrits 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 correspond à 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 pour tous. Par exemple, on souhaitait que les raisons thématiques d'un choix de valeur de paramètre soient explicitées, justifiées et partagées par les thématiciens auprès les modélisateurs. À l'inverse, les modélisateurs devaient expliciter les partis-pris, biais ou encore alternatives des choix d'implémentation effectués, par exemple en détaillant le point de vue adopté dans l'implémentation d'un mécanisme concernant les actions d'un type d'agent (cf. chapitre 2, encadré 2.2).

Sans chercher à ce que chacun des chercheurs impliqués dans la construction de SIMFEODAL ne devienne omnicomptent, notre approche visait toutefois, dans la mesure du 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 réalisés.

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 doivent donc tendre vers un objectif idéal de transdisciplinarité, où les points de vue disciplinaires s'effacent et se confondent (GRAVIER 2018, p. 14). Pour reprendre l'expression de BANOS (in OURIACHI, MATHIAN et al. (2017)), dans un processus de co-construction absolu, chacun devrait devenir « modélicien ».

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 effective est donc bien celle de l'interdisciplinarité, complémentaire autour de sujets communs, et non celle de la transdisciplinarité.

Il me semble en effet que ces points de vue disciplinaires sont d'une part difficilement « effaçables » 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, connaissances et surtout interactions avec les membres du projet.

Ma position dans la construction de SIMFEODAL n'est donc pas celle d'un pur modélisateur. C'est une position de géographe, soucieux des dynamiques spatiales observées et attaché à l'analyse de leur générnicité. C'est une position de modélisateur, attentif aux choix de modélisation de ces dynamiques et curieux de l'éventail des possibles qui peut en surgir. C'est une position d'informaticien, prudent face aux biais d'implémentations du modèle et attiré par l'esthétique d'un code parcimonieux, explicite et performant. C'est une position de géomaticien, appliquée sur les détails des mécanismes géométriques mis en œuvre et enthousiaste quant à la représentation de leurs effets. C'est une position tout à la fois composée de toutes celles-ci, qui ajoute à l'interdisciplinarité de ce projet de co-construction une certaine forme d'inter-positionnement.

1.4.2 Mettre en place des interfaces disciplinaires

Dans les projets interdisciplinaires, il est utile qu'un des membres, doté de connaissances dans les disciplines impliquées, joue le rôle de médiateur par sa position d'interface entre les disciplines. Dans le groupe de travail constitué autour de SIMFEODAL, il n'y a pas eu de tel chercheur, et la médiation n'a pu se faire qu'au travers une vision collective et partagée d'un objet commun, le modèle.

Dans ma thèse, j'ai mis en place différentes « interfaces », entre les disciplines et entre les chercheurs, visant à faciliter la co-construction du modèle. Le terme d'interface me paraît adapté car il est polysémique, et certains de ses sens correspondent tout à fait à la démarche de ce travail. Pour les épistémologues, l'interface interdisciplinaire renvoie aux concepts et outils partagés par plusieurs disciplines, tel qu'illustré par GRAVIER (2018) dans sa thèse (voir figure 1.2), où cette chercheuse se situe elle-même à l'interface entre géographie et archéologie. En reprenant une définition grand-public, l'interface est donc ici une « limite commune à deux systèmes, permettant des échanges

entre ceux-ci » (LAROUSSE 2019).

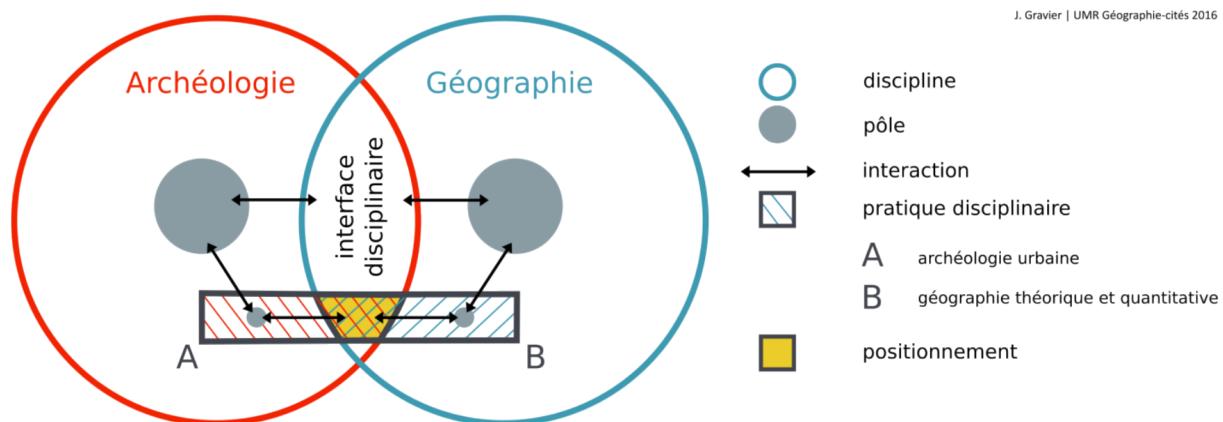


FIGURE 1.2 – Le « positionnement d'interface disciplinaire entre l'archéologie urbaine et la géographie théorique et quantitative » de GRAVIER (2018, fig. 1.3, p. 18).

Dans notre cas, c'est le modèle SIMFEODAL qui s'inscrit précisément dans cette même interface disciplinaire, et non l'un des chercheurs qui le co-construit. En informatique, une interface peut aussi être un « ensemble de règles, de conventions permettant un échange d'informations entre deux systèmes, deux éléments d'un système, ou entre l'utilisateur et la machine » (ACADEMIE FRANÇAISE 2019). La dernière définition est souvent employée, sous la forme « d'interfaces utilisateur » (Interfaces Homme-Machine, IHM), qui peuvent notamment prendre une forme graphique, on parle alors d'interfaces graphiques ou, en anglais, de « *Graphical User Interface* » ou GUI.

Dans cette thèse, ces usages épistémologiques et informatiques se confondent. SIMFEODAL est un modèle de simulation, un outil informatique, mais sa dimension collective et heuristique constitue une interface interdisciplinaire au sens épistémologique. La démarche graphique mise en place, autour de l'évaluation visuelle, est bien une interface, c'est-à-dire une « convention qui permet un échange », pour reprendre la définition précédente (*ibid.*), entre les utilisateurs. Enfin, cette démarche est rendue possible par la création d'interfaces graphiques, au sens informatique, qui facilitent la visualisation des sorties du modèle, et permettent dès lors d'appréhender le modèle de manière exploratoire.

Une interface via la modélisation. L'une des conclusions du projet TransMon-Dyn 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 1.3), 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, LIBOUREL et al. 2017, p. 458).

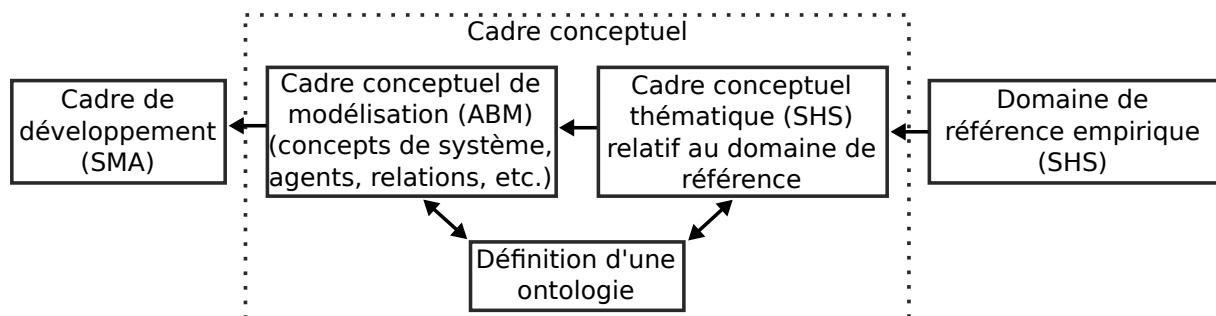


FIGURE 1.3 – « L'ontologie comme médiateur d'un dialogue » de PHAN (2014, fig. 2.7, p. 68).

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, qui aboutit sur un modèle de simulation, force donc plus encore que la modélisation conceptuelle à expliciter tous les choix effectués dans la modélisation.

Les quelque 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 constitue un apport qui ne se restreint pas à la possibilité de validation ou d'utilisation effective (à but prédictif par exemple) du modèle. L'implémentation permet surtout de prolonger et renforcer l'explicitation, pousse à l'échange interdisciplinaire, et à ce titre, constitue aussi une méthode qui sert d'interface interdisciplinaire.

Une interface via la visualisation. Dans cette thèse, nous mettons en place une approche basée sur la représentation graphique et l'exploration visuelle, qui est employée tout au long du cycle de construction du 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.

De manière générale, je défends l'idée que les apports de la modélisation comme outil d'interdisciplinarité s'appliquent tout autant à la visualisation²². Comme la modélisation à base d'agents, la visualisation est un « langage » compréhensible par le plus grand nombre, ne reposant pas sur un formalisme mathématique parfois excluant. Comme la modélisation, la réalisation d'une représentation graphique pousse à l'explicitation de

22. Cette position est explicitée et détaillée dans CURA (2020, à paraître).

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. Ces interfaces permettent 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 favoriser l'interdisciplinarité, en constituant une nouvelle 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 statistiques²³, spatiales²⁴, ou encore spatio-temporelles²⁵ permet de favoriser un raisonnement abductif (BANOS 2005). Pour YU (1994, in BANOS (*ibid.*, p. 2)) l'abduction désigne la « capacité de l'être humain à générer des hypothèses temporaires à partir de l'information qu'il reçoit ». En tant que position scientifique, BANOS (*ibid.*, p. 2) interprète l'abduction comme « la capacité du scientifique à se mettre en position d'étonnement, à se laisser guider par la recherche de l'inattendu ».

L'abduction est très liée à l'analyse exploratoire de données, car fortement liée à la logique exploratoire : le raisonnement abductif survient quand on accepte de raisonner sur la seule base des données disponibles, sans chercher à les interpréter en fonction d'hypothèses pré-conçues auparavant.

La modélisation peut être guidée ou influencée par un principe d'abduction (BANOS 2013, p. 77), d'autant plus quand elle s'inscrit dans une logique exploratoire, acceptant là aussi de se fier « uniquement » au modèle sans chercher forcément à interpréter ses écarts à la situation empirique comme des erreurs qui devraient être corrigées.

MORIN (1994) note qu'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, en favorisant l'abduction, va aussi dans le sens d'une facilitation de l'interdisciplinarité. Cette ap-

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

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

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

proche de modélisation exploratoire constitue dès lors, elle aussi, une interface disciplinaire : il s'agit bien d'une limite commune à l'archéologie et à la géographie qui permet les échanges entre ces disciplines²⁶. 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 S'engager dans une 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 lors de chacune des étapes de la co-construction et de l'évaluation de SIMFEODAL, et constitue à chaque fois l'approche principalement suivie. Dans cette dernière partie de définition du positionnement de ce travail de thèse, il me paraît important de préciser 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 leurs buts (MITHEN 2018, pp. 176–177, cité par LAKE 2014, p. 260). Il distingue trois types de modèles de simulation, selon :

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.

Ce troisième type me paraît plus distant de notre usage, l'objectif de SIMFEODAL n'étant pas de proposer des méthodes innovantes dans le champ de la modélisation à base d'agents. Au contraire, les objectifs de SIMFEODAL l'inscrivent tout à fait dans les deux premiers types, que LAKE explicite ainsi :

« 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. »

26. Pour paraphraser les termes de la définition du LAROUSSE donnée plus haut.

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. Cette confrontation de données empiriques et simulées est d'autant moins adaptée dans notre cas que les données empiriques sont très hétérogènes et lacunaires.

L'usage principal du modèle est donc expérimental. On cherche bien à explorer les résultats d'interactions complexes entre agents, entre comportements pour accompagner la construction théorique. On cherche toutefois tout autant à expérimenter les structures et processus que le modèle fait émerger, potentiellement sous l'influence de « scénarios thématiques », ce qui nous permet de tester des hypothèses. Finalement, le modèle sert surtout de support au dialogue collectif et interdisciplinaire, mais il permet aussi, individuellement, pour chacun des participants, de repenser ou réorganiser la compréhension de la transition étudiée 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 expérimentés. Par exemple, le fait que certains indicateurs de sortie de simulation – ou pire, de mécanismes – 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 priment les itérations entre le modèle, les résultats qu'il produit et les connaissances expertes sur lesquelles il s'appuie. Dans ce mode de développement, tout élément du modèle implanté peut être amené à évoluer, faisant alors évoluer l'élément équivalent dans le modèle conceptuel. Si l'exploration du comportement du modèle montre qu'un type d'agent est peu utile, ou au contraire, qu'il serait judicieux de mieux distinguer des sous-types d'agents et de les doter de mécanismes propres, alors nous adapterons le modèle conceptuel. Si les thématiciens, à l'occasion de nouvelles lectures, décident que le modèle conceptuel doit être modifié, alors il sera changé et donnera lieu à une nouvelle implémentation. Cet aller-retour constant, où l'on accepte que les éléments, conceptuels ou implantés, sont susceptibles de changer 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). L'impermanence des indicateurs de sortie (cf. chapitre 3, encadré 3.2) en est une conséquence directe. C'est en menant des analyses de ces indicateurs que l'on peut réaliser leurs défauts, ou leur incapacité parfois à départager différentes versions d'un modèle. C'est aussi en menant ces analyses que l'on peut constater le besoin de créer de nouveaux indicateurs, qui donneront une vision plus précise, ou légèrement différente, d'un phénomène quelconque.

Dans l'EDA, ce sont les données – et les motifs qui en surgissent – qui guident l'analyse et orientent vers l'étude de variantes ou transformations de ces mêmes données (normalisation des données, transformation en logarithmes, etc.). Dans l'exploration de SIMFEODAL, ces « données », c'est-à-dire les indicateurs de sortie, guident elles-aussi l'évaluation du modèle, et leur étude entraîne de par là même des transformations de ces indicateurs (précision, distinction de catégories, changement de la méthode de calcul, etc.).

Dans l'approche classique, la visualisation n'est mobilisée qu'au début du processus d'évaluation, lors de la phase de « *face validation* ». L'approche proposée dans cette thèse, nommée « évaluation visuelle » (voir chapitre 3, section 3.1.4), accorde au contraire un rôle clé à la visualisation tout au long du processus d'évaluation. Les indicateurs de sortie sur lesquels on se base pour évaluer le modèle sont potentiellement classiques, mais le choix de faire reposer l'évaluation uniquement sur l'analyse visuelle de ces indicateurs me semble quant à elle assez hétérodoxe et profondément exploratoire.

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, comme les indicateurs et la méthode d'évaluation, 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 modalités de l'évaluation, telles que présentées 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, visuelle, de ses sorties.

1.4.4 Poursuivre une démarche reproductible

La démarche d'ensemble poursuivie dans cette thèse est très exploratoire, et l'ensemble de ses composants ou étapes ont largement évolué durant les six années de cette expérience de co-construction interdisciplinaire. Pour autant, afin que cette expérience puisse avoir une portée supérieure à celle d'un projet ponctuel, nous avons collectivement porté attention à lui garantir une certaine reproductibilité. L'objectif, ce faisant, était que le modèle mis en place, et la démarche liée, puissent servir à d'autres chercheurs, notamment en histoire, en archéologie, en géographie, et de manière plus générale aux chercheurs s'intéressant à des phénomènes se déroulant sur de longues périodes temporelles. Ceci afin d'accompagner ces chercheurs, à leur tour vers la modélisation de processus spatio-temporels sur le temps long. Dans les paragraphes suivants,

je détaille les méthodes mises en places dans ce projet pour appuyer la reproductibilité technique, méthodologique et conceptuelle de l'approche de co-construction de SIMFEODAL.

Réplicabilité technique. REY-COYREHOURCQ et al. (2017) différencient reproductibilité, répétabilité et réplicabilité en ces termes :

« Les définitions les plus courantes de ces notions sont ancrées dans le vocabulaire de la métrologie et des sciences computationnelles. Elles se rapportent donc au contrôle d'un ensemble de mesures. Dans le cas de la répétabilité, il s'agit d'effectuer des mesures répétées sur un même objet ou des objets similaires dans des conditions spécifiques. Dans un contexte de reproductibilité, ces mesures sont réalisées avec des instruments différents et dans des conditions variables (lieu, opérateur) qui doivent alors être spécifiées. La réplicabilité a été étudiée dans le domaine informatique et désigne la capacité de reproduire à l'identique les résultats d'une analyse. »

ibid., p. 411

Nous avons veillé à garantir la **réplicabilité** de tout ce qui est décrit dans cette thèse en partageant les sources. Cela concerne bien sûr le modèle SIMFEODAL en lui-même²⁷, mais aussi les expériences qui ont été simulées²⁸ et les outils permettant leur exploration²⁹.

À chaque fois que possible, les différentes versions des logiciels et *packages* utilisés sont précisées dans les sources, et ce faisant, on approche ainsi d'une compléition de l'ensemble des « paliers de réplicabilité » décrits dans la figure 1.4.

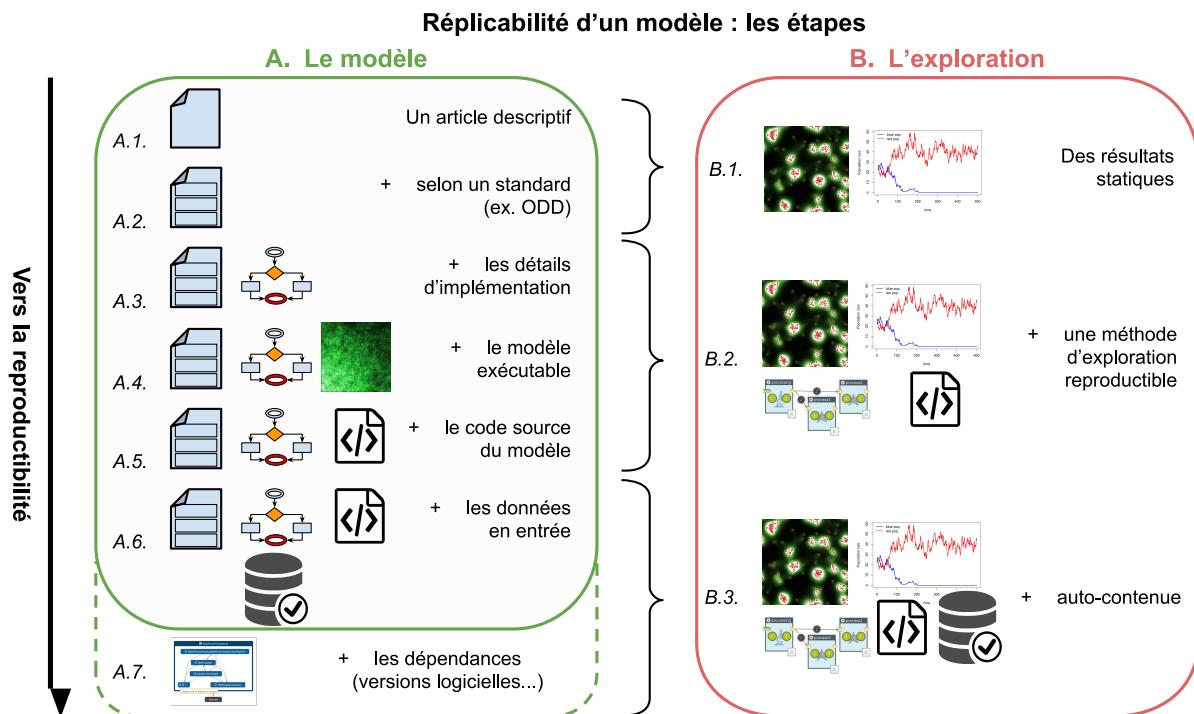


FIGURE 1.4 – « Les paliers de réplicabilité d'un modèle de simulation et de son exploration » in REY-COYREHOURCQ et al. (2017, fig. 3, p. 427).

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

28. Dans le dossier /experiments/ du dépôt de SimFeodal.

29. <https://github.com/RCura/SimEDB>

Pour renforcer cette réplicabilité technique et lui donner une dimension universelle, c'est-à-dire pour que chacun puisse répliquer les expériences et résultats produits avec SIMFEODAL, nous avons de plus fait le choix, militant, de ne mobiliser que des outils sous licences libres. C'est le cas de la plateforme de simulation GAMA (TAILLANDIER et al. 2018) avec laquelle SIMFEODAL a été conçue, c'est aussi le cas du langage de programmation R (**r_core_team_r_2019**) utilisé pour toutes les analyses, de la base de données OmniSciDB utilisée dans la plateforme d'exploration des données (ROOT et MOSTAK 2016), et des outils utilisés pour construire cette plateforme (**chang_shiny_2017**).

Au-delà des productions « logicielles » liées à SIMFEODAL et à son exploration, notons que dans le cadre de ce manuscrit de thèse, les outils mobilisés sont eux aussi libres : ce manuscrit est rédigé avec **LATEX**, les figures ont été produites avec R³⁰ ou avec le logiciel libre de dessin vectoriel Inkscape, le tout en utilisant un système d'exploitation libre pour la rédaction comme pour l'exécution des simulations.

Reproductibilité méthodologique et conceptuelle. Les solutions techniques, et la publication de leurs sources, présentées dans ce travail de thèse garantissent une réplicabilité technique. Cette dernière n'est pourtant qu'un des composants, et sans doute le plus simple, de la reproductibilité plus large que nous visons.

Nous souhaitons ainsi que l'expérience qui est la nôtre puisse servir ou inspirer d'autres projets, et avons pour cela tenté de communiquer autant que possible sur SIMFEODAL. Ces communications, orales ou écrites, visaient différents publics, représentatifs des concepteurs du modèle. Il s'agissait ainsi d'une part d'inspirer des archéologues et historiens à se lancer dans l'expérience de la modélisation, au moyen du paradigme des modèles à base d'agents qui nous semble porteur et accessible. Pour que ces restitutions de notre travail trouvent une résonance, et donc une audience adaptée, elles ont été effectuées devant un public d'archéologues et d'historiens sensibles aux méthodes (Journées Informatique et Archéologies de Paris, Séminaire TransMonDyn à Washington State University, organisation en cours d'un séminaire de restitution à destination d'historiens).

Il s'agissait aussi de convaincre des chercheurs pratiquant déjà la modélisation de l'intérêt de l'étude des dynamiques spatiales sur le temps long, par exemple à travers des chapitres d'ouvrages interdisciplinaires (TANNIER et al. 2014; CURA, TANNIER et al. 2017), en ciblant notamment la communauté de la géographie théorique et quantitative, que ce soit à l'occasion de colloques (ThéoQuant 2015 et 2017, ECTQG 2015, 2017 et 2019) ou de journées d'études liées à d'autres projets de modélisation.

En dehors des publications et communications qui marquent des « points d'étape » de la construction du modèle et de son exploration, nous avons fait le choix d'en « versionner » l'évolution, dans un dépôt logiciel de versionnement adapté, afin que celle-ci puisse être retracée et analysée *a posteriori*. C'est aussi le cas de la plateforme d'exploration des sorties du modèle, SIMEDB, dont le dépôt retrace l'ensemble des évolutions décrites dans le chapitre 4 (section 4.2).

De manière plus large, ce manuscrit s'inscrit dans la volonté de replacer le modèle

30. Les données et codes-sources en sont alors disponibles dans le dépôt logiciel de ce manuscrit.

SIMFEODAL dans le cadre plus large des modèles descriptifs, exploratoires et conçus dans un cadre interdisciplinaire. Ces dépôts logiciels concourent à l'intention de retracer le raisonnement – générique et spécifique – qui a amené au modèle SIMFEODAL tel que présenté dans le chapitre 2. En cherchant à documenter les alternatives disponibles qui ont été rencontrées tout au long de la conception du modèle et de la plateforme d'exploration de ses sorties, en cherchant à justifier les choix effectués, qu'ils soient conceptuels (chapitres 2 et 3), méthodologiques (chapitres 3 à 5) ou parfois techniques (chapitre 4), en suivant des modes de descriptions standards (ODD pour le modèle, MCD pour la base de données), je suis convaincu d'accroître le potentiel de reproductibilité du modèle, et plus largement, de la démarche mise en place pour le construire et l'évaluer.

Cette thèse prend ainsi la forme d'un retour d'expérience, partial mais argumenté, et surtout documenté autant que possible. L'ambition est d'ouvrir la voie à d'autres expériences de ce type et de tenter de convaincre de l'intérêt, pour les projets interdisciplinaires, tout à la fois, de la modélisation à base d'agents, d'une démarche de co-construction, et de la commodité des approches visuelles pour les accompagner.

Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai précisé les objets étudiés dans ce travail de thèse, la manière de les étudier, et les raisons, contextuelles et liées à mon parcours personnel, qui ont orientées les approches mises en place.

De manière générale, on peut résumer ces approches au moyen des quatre termes mis en exergue dans la dernière partie de ce chapitre. Autour d'un objet de recherche constitué par la modélisation de dynamiques spatiales sur le temps long, dans un contexte interdisciplinaire, je défends ainsi une approche résolument ancrée dans la co-construction. Celle-ci va plus loin que l'accompagnement dans l'interaction entre « thématiciens » et « modélisateurs » en cherchant autant que possible à faire prendre part, à chacun des participants de projet, à l'ensemble des étapes de conception, de construction et d'évaluation du modèle. L'ambition n'est pas que chaque participant devienne expert dans chacune de ces étapes, mais que toutes les décisions adoptées dans ces étapes soient collectives et justifiables par chacun.

La démarche de co-construction est facilitée par l'adoption d'une approche exploratoire de la modélisation. Collectivement, nous ne cherchons pas à créer un modèle qui soit validable et utilisable, par exemple à but rétro-prédicatif, mais au contraire à construire un modèle exploratoire, dont la construction et l'exploration en elles-mêmes sont les vecteurs d'acquisition de connaissance par les participants au projet. En multipliant les allers-retours entre la conception, l'implémentation et l'évaluation du modèle, on adopte une position exploratoire qui s'inscrit dans une certaine visée abductive.

Pour que cette approche exploratoire puisse toutefois être mobilisée par d'autres et ne se cantonne pas à une expérimentation isolée, nous faisons le choix de documenter, pour en assurer la réplicabilité, toutes les productions informatiques mises en œuvre autour du modèle SIMFEODAL. Pour aller plus loin, nous documentons aussi les nombreuses évolutions du modèle, de son évaluation et de son exploration, au sein d'outils de versionnement publics et au travers de disséminations académiques diversifiées de nos travaux. On cherche ainsi à tendre vers la reproductibilité de la démarche mise en place, de manière à inscrire ce retour d'expérience dans un cadre de cumulativité des connaissances (PUMAIN (2005), citée par REY-COYREHOURCQ et al. (2017), p. 431).

Ce faisant, je positionne l'ensemble des travaux décrits dans cette thèse comme des instruments d'interface disciplinaires. Les choix du paradigme de modélisation à base d'agents, d'une démarche de co-construction, de méthodes d'évaluation visuelles et interactives, sont, à mon sens, autant de solutions permettant de faciliter l'interdisciplinarité en s'inscrivant dans des domaines scientifiques accessibles et communs aux membres du projet. Le modèle SIMFEODAL se situe à l'interface entre géographie et sciences historiques, la plateforme d'exploration SIMEDB à l'interface entre modélisation en sciences sociales et informatique liée à l'interaction homme-machine. Ces outils et les approches suivies pour leur construction participent au rôle d'interface de ce travail de thèse, et plus largement, de ce projet collectif et interdisciplinaire de modélisation.

Ma position personnelle n'est pas celle d'une interface – je suis géographe, modéli-

1.4. VISUALISER ET EXPLORER POUR CO-CONSTRUIRE UN MODÈLE : CONCEPTION D'INTERFACES EXPLORATOIRES

sateur, géomaticien – mais celle d'un passeur, sélectionnant des outils et méthodes éprouvés dans chacune des communautés afin de les agencer et de les mettre au service d'un projet collectif.

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

Sommaire

Avant-propos	50
Introduction	52
2.1 Objectifs du modèle SimFeodal – <i>Purpose</i>	54
2.2 Entités et échelles – <i>Entities, state variables, and scales</i>	57
2.3 Fonctionnement général – <i>Process overview and scheduling</i>	65
2.4 Concepts de modélisation – <i>Design concepts</i>	79
2.5 Situation initiale – <i>Details - Initialisation</i>	85
2.6 Données en entrée – <i>Input data</i>	89
2.7 Mécanismes spécifiques – <i>Submodels</i>	90
Conclusion	105

Avant-propos

Ce chapitre décrit un modèle, SIMFEODAL, issu d'un travail profondément collectif et interdisciplinaire. La paternité de ce modèle est ainsi tout autant la mienne que celle de ses co-concepteurs :

- 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 retravaillée, d'un chapitre (CURA, TANNIER et al. 2017) de l'ouvrage collectif *Peupler la terre* (SANDERS 2017) issu du projet TransMonDyn¹.

Dans ce chapitre, nous présentons une version de SIMFEODAL (v6.3) différente de celle présenté dans 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, BERGER 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 ce dernier n'est de plus pas conçu pour une description aussi détaillée que celle que nous proposons dans ce chapitre. Nous pensons néanmoins que le suivi de ce protocole de description permettra d'accroître la reproductibilité de SIMFEODAL. Pour cette 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. Projet ANR (ANR-10-BLAN-1805), coordonné par Lena SANDERS, entre 2011 et 2014 : www.transmondyn.parisgeo.cnrs.fr

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	Which general concepts, theories or hypotheses are included in the model's design ? How were they taken into account ?
		Emergence	What key results are emerging from the adaptive traits, or behaviors of individuals ? What results vary in complex/unpredictable ways when particular characteristics change ?
		Adaptation	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 ?
		Objectives	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 ?
		Learning	May individuals change their adaptive traits over time as a consequence of their experience ? If so, how ?
		Prediction	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 ?
		Sensing	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' ?
		Interaction	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 ?
		Stochasticity	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 ?
		Collectives	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 ?
		Observation	What data are collected from the ABM for testing, understanding, and analyzing it, and how are they collected ?
Details	5. Initialisation		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 ?
	6. Input data		Does the model use input from external sources such as data files or other models to represent processes that change over time ?
	7. Submodels		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

Dans le chapitre précédent (chapitre 1) nous avons précisé le positionnement disciplinaire de cette thèse, située entre géographie, modélisation et informatique. Ce positionnement, pleinement ancré dans une approche méthodologique, 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 suivis. Dans ce chapitre, nous présentons donc de manière détaillée le modèle de simulation collectivement conçu : SIMFEODAL, acronyme de « **S**imulation de la **F**ixation, de l'**É**mergence et de l'**O**rganisation **D**ynamique d'Agrégats de population **L**ocalisés ».

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 dans un second temps (voir chapitre 1). Ce type de modélisation permet de concilier différentes formes de procéder dans l'élaboration de modèles, en épargnant en particulier aux experts thématiciens de mener des généralisations hâtives, sans ancrage empirique, qui nuiraient 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 6 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, etc.) sont 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, 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 thématiciens sont chacun spécialistes de différents aspects du modèle (lignages seigneuriaux, communautés, etc.), aspects qui seront dès lors modélisés de manière plus fine et détaillée. SIMFEODAL a de plus été construit de manière itérative et incrémentale, ce qui renforce cette hétérogénéité de niveaux de généralisation.

Au delà de l'hétérogénéité du modèle due au mode de construction et à celle des connaissances expertes, qui rendent 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 2014². On présente, dans ce chapitre, la version « 6.3 » du modèle (voir l'historique des versions dans le tableau 3.1), 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.

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

2.1 Objectif du modèle SimFeodal – *Purpose*

Le contexte de réalisation du modèle SIMFEODAL a été présenté dans le chapitre 1 (section 1.2), de même qu'une première description, brève, des processus sociaux et spatiaux que l'on cherche à reproduire dans le modèle (section 1.2.2).

Dans cette partie, une description plus approfondie du modèle permet de mettre en avant l'aspect thématique de ce dernier, tant dans les questions étudiées que dans le contexte historiographique dans lequel ces questions s'inscrivent.

2.1.1 Contexte historiographique

Le contexte historique dans lequel s'inscrit le modèle SIMFEODAL est riche et très étudié par les médiévistes. Il est associé à un paysage scientifique 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, TANNIER et al. 2017, Introduction du chapitre). L'analyse historiographique relève surtout des connaissances expertes thématiques, et à ce titre, n'aurait pas véritablement de sens à être ré-écrit par l'unique auteur de cette thèse.

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 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'émettement 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 vil-

lageois, 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, TANNIER et al. 2017, p. 301-302

2.1.2 Questionnement

Dans ce contexte, nous avons cherché à étudier, avec une approche « résolument géographique » (CURA, TANNIER et al. 2017, 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 l'approche modélisatrice sont multiples. On estime ainsi, d'après les connaissances expertes des thématiciens du projet, que ces processus spatiaux résultent d'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 ». Suite au tarissement des sources de richesse issues du pouvoir central et de son économie de razzia, une compétition émerge entre les seigneurs. Celle-ci est matérialisée par l'apparition ou l'accroissement d'un climat de violence, en particulier entre les seigneurs de même régions.
- 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) impliquant 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, etc.), créées

par et pour les populations, qui permettent la constitution de contre-pouvoirs face à des seigneurs féodaux qui prélèvent de plus en plus de droits.

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 ces derniers ; 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'émettement des pouvoirs, émerge un intérêt réel, pour les paysans dispersés, à la concentration.

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, TANNIER et al. 2017, Tableau 1, p. 309–310).

Au cœur du modèle, on trouve les **foyers paysans**³. Chaque agent représente une famille paysanne médiévale et son 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 des générations successives de paysans d'une famille. Chaque foyer paysan est caractérisé par une *localisation* (son lieu de résidence à un instant t) et par une *satisfaction* qui va déterminer sa propension à migrer. Cette satisfaction 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).

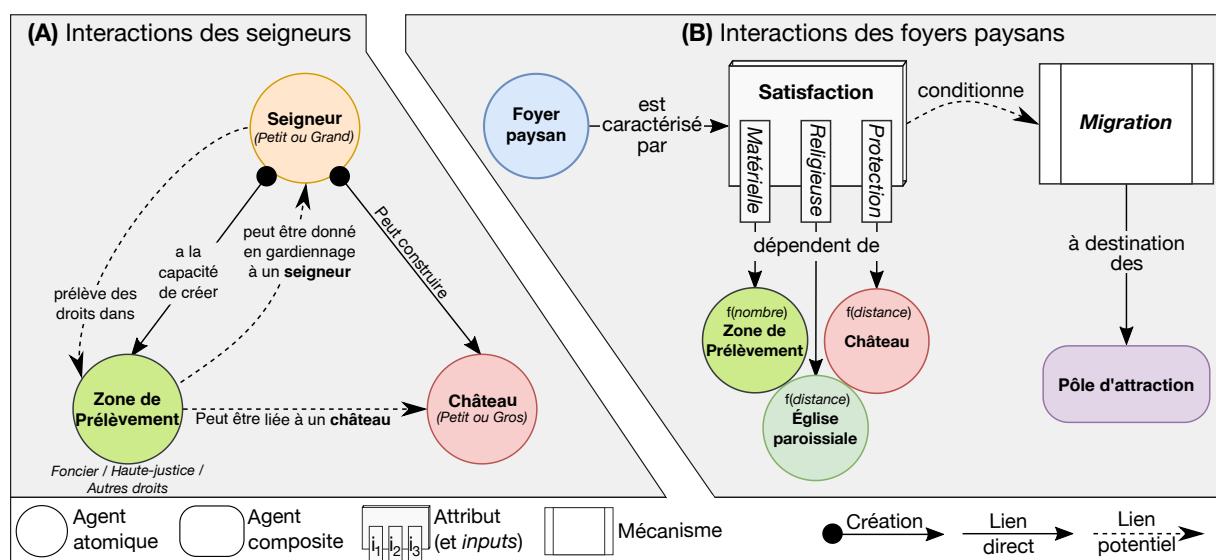


FIGURE 2.1 – Interactions des agents : seigneurs (A) et foyers paysans (B).

3. 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).

Les agents pouvant influencer le niveau de satisfaction ou d'insatisfaction des foyers paysans peuvent être catégorisés en cinq groupes, en fonction de 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 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 (ponctuelles) 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, etc.). 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 »⁴ 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 disparaît.
- Les agents « **pôles d'attraction** » :
il s'agit ici encore d'agents composites, cette fois constitués d'un ou de 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.

4. Par opposition aux autres types d'agents, dénommés « atomiques » dans la figure 2.1.

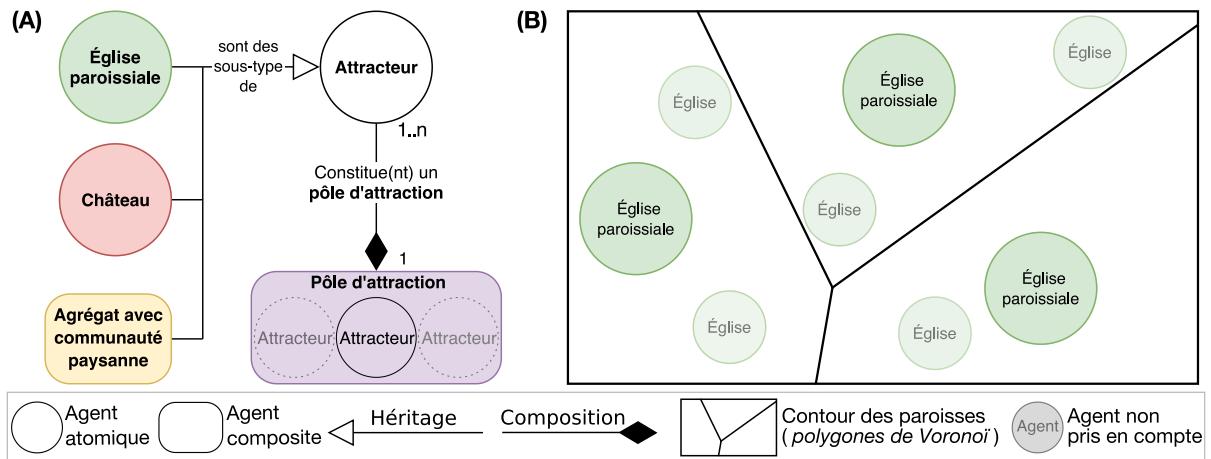


FIGURE 2.2 – Constitution des pôles d'attraction (A) et des paroisses (B).

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.

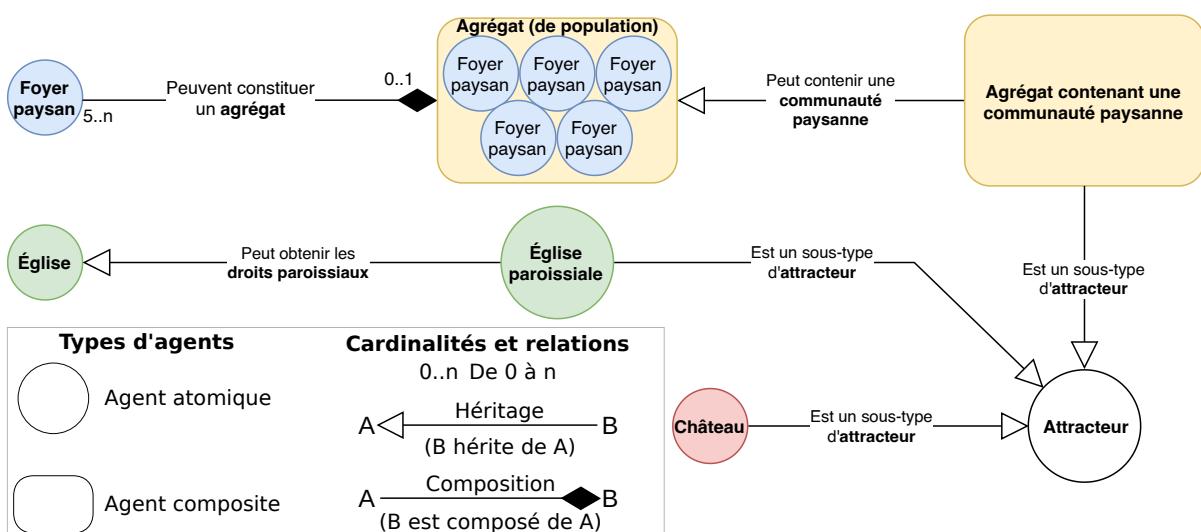


FIGURE 2.3 – Héritages et compositions des agents de SIMFEODAL.

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	≈ 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 : Les agents sans emprise spatiale (—) ne sont pas localisés dans l'espace du modèle.

β : Les agents sans comportements actifs (—) n'agissent pas en tant que tel, mais peuvent servir de support pour les actions d'autres agents.

γ : Ces agents sont également 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

L'espace du modèle est 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 simple 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 ce qui se fait usuellement 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 discrétisation 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. Par sa nature isotropique, il n'est pas utile d'y différencier 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 grandeur peuvent être très variables (de la centaine de mètres à plus de 10 km). Nous avons préféré ne pas procéder à une discrétisation de l'espace, compte tenu de cette variabilité, afin de ne pas artificiellement réduire la précision des relations spatiales.

L'espace est formalisé sous la forme d'**un carré de 80 km de côté**, proche de l'ordre de grandeur des diocèses médiévaux, maillage territorial relativement stable dans le temps depuis cette époque médiévale jusqu'à aujourd'hui. 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 qui est à peu près équivalent à ce département, sont d'environ $6\ 000 \text{ km}^2$. En choisissant un espace support de $80 \times 80 \text{ km}$ ($6\ 400 \text{ km}^2$), 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 donc de $79 \times 79 \text{ km}$, soit $6\ 084 \text{ km}^2$.

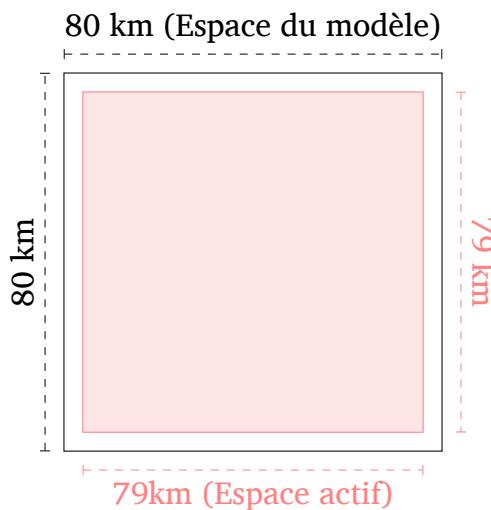


FIGURE 2.4 – L'espace support de SIMFEODAL, un monde théorique.

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*⁵ : 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 sur le degré de concentration ou de dispersion dans l'ensemble de l'espace « actif » des foyers paysans.

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 de commencer à la même date, mais de prolonger l'exécution du modèle d'un siècle, soit de **de 800 à**

5. 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.

1200⁶. Prolonger cette date d'observation des résultats du modèle permet d'analyser le comportement du modèle après la période même de la transition identifiée, à une date où le système de peuplement est pleinement inscrit dans son régime post-transition (régime 2, cf. section 1.2.2). On peut ainsi, entre autres, 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**. Ce choix s'explique par 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 difficile à préciser. Le niveau de résolution temporel de ces processus est difficilement réductible à moins d'un demi-siècle, et à peine meilleur pour les éléments matériels. Une vision continue du temps s'inscrirait ainsi dans une certaine sur-détermination du modèle par 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 probabilistes, 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 ascendants. Cela correspond aussi à la précision globale que l'on peut avoir de l'apparition d'éléments matériels tels que les églises, paroisses et châteaux⁷. 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 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

6. Dans les versions précédentes de SIMFEODAL (par exemple dans CURA, TANNIER et al. (2017)), cette date était fixée à 1160. Nous avons choisi de prolonger de 40 ans la date de fin parce que cela permet de comparer l'état final du modèle au début du XIII^e siècle, pour lequel certaines données empiriques supplémentaires sont disponibles. 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.

7. 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 précision moyenne est généralement de l'ordre de 20 à 40 ans.

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).

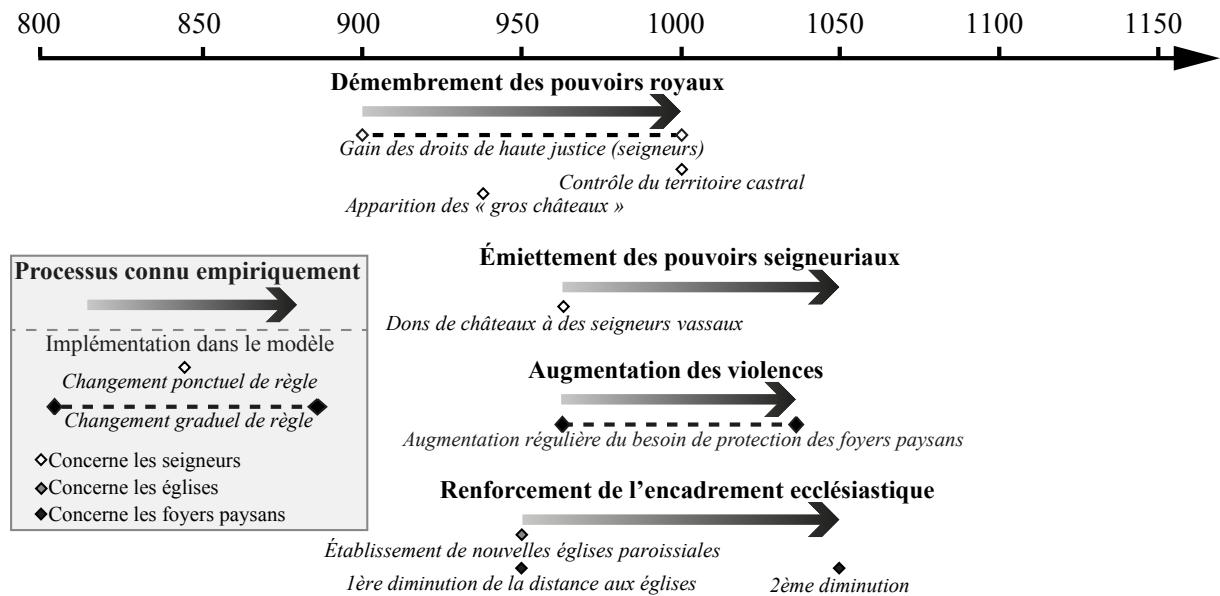


FIGURE 2.5 – Frise chronologique des processus historiques observés en Touraine implémentés dans SIMFEODAL. D'après CURA, TANNIER et al. (2017, fig. 2, p. 315).

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, section 1.3.2). 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, en accord avec les spécifications du formalisme ODD (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, lié aux 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, tandis que les seconds sont encadrés en grisé.

Notons enfin que dans le cas des « mécanismes globaux »⁸ et de certains mécanismes très techniques (mise à jour des agrégats ou des pôles par 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 qui sont présentés interagissent. Certains de ces mécanismes peuvent être guidés par les connaissances expertes, mais ils peuvent aussi remplir un rôle purement technique (enregistrement des *outputs* par exemple), nécessaire au bon fonctionnement du modèle mais n'ayant pas d'inscription ou de correspondance empirique.

Ordonnancement général

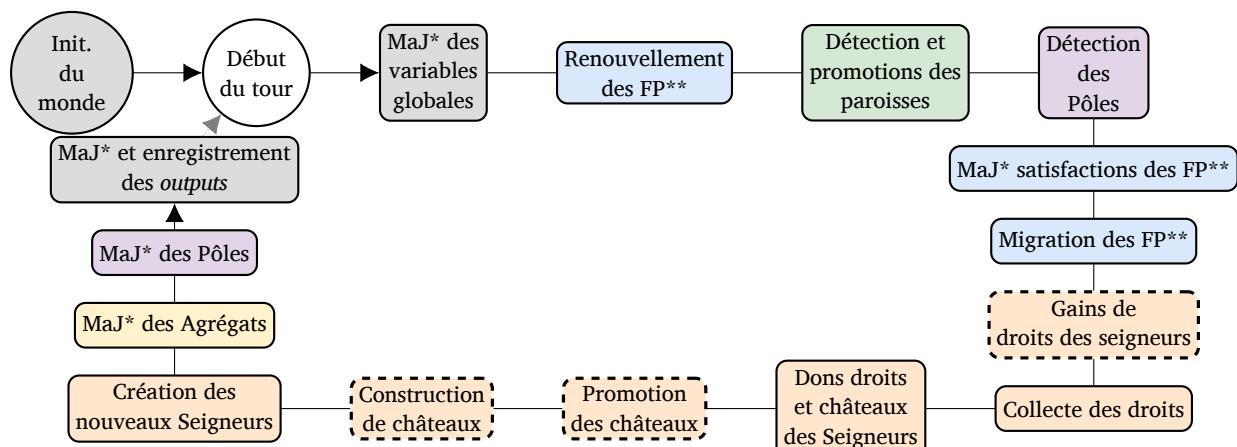


FIGURE 2.6 – Ordonnancement des mécanismes de SIMFEODAL.

Mécanisme global Foyers Paysans Églises Agrégats Pôles Seigneurs Temporaire

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

8. 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.

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 et de localiser les églises, paroissiales ou non, les seigneurs, et surtout, les foyers paysans. Ces derniers, 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 localement, mais organisée selon une structure macrogéographique prédéfinie. Pour que ces deux contraintes, d'apparence 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 qui correspondent 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 aléatoirement, se verront dotées de droits paroissiaux. Ces églises paroissiales constitueront ainsi 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 qu'ils 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, l'évolution des distances que les foyers paysans sont prêts à parcourir pour se rendre à l'église, etc. La mise en place de mécanismes tributaires de dates nous permet ainsi de représenter des événements exogènes au modèle, qui peuvent dès lors servir de déclencheurs ou de catalyseurs à des processus de longue durée. L'incrémentation de la date et les mises à jour des différentes variables temporelles 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 clos. 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. C'est une limite forte, par ailleurs fréquente dans la modélisation où l'espace joue un rôle, car empiriquement, les systèmes sont rarement entièrement fermés et isolés. Il est ainsi difficile de s'abstraire du contexte spatial, en particulier dans un modèle simulant des migrations. 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 anciennement romanisée).

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 part (5%) des foyers paysans existant est 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. Les 10% restant seront placés dans les agrégats existant selon un tirage aléatoire pondéré : les agrégats les plus peuplés attireront potentiellement plus de ces nouveaux foyers paysans que les moins peuplés⁹.

2.3.4 Mise à jour du maillage paroissial

Le Moyen Âge voit apparaître un maillage territorial 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 sur le moment où elles

9. Cette logique d'attachement préférentiel (voir section 2.4.1) permet de modéliser l'attractivité qu'exercerait un agrégat peuplé, potentiellement plus connu, sur des foyers paysans venant de régions voisines.

constituent un maillage complet (vraisemblablement pendant la période modélisée). Ils s'accordent cependant sur le rôle de fixation du peuplement et de stabilisation du territoire qu'elles ont eu (ZADORA-RIO 2008). On sait également, d'après les données et connaissances empiriques, que la répartition des églises paroissiales n'est pas homogène et qu'elle dessine des mailles de dimensions inégales. Dans les zones rurales, l'espaceissement des églises paroissiales est assez important (quelques kilomètres entre deux églises), tandis que dans les zones urbaines, plusieurs églises paroissiales coexistent au sein d'une même ville.

Dans SIMFEODAL, le maillage paroissial est représenté par 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. Par construction, une tessellation de Voronoï dépend du semis de point à partir duquel elle est calculée. Il est donc nécessaire recalculer ce maillage à chaque fois que l'on ajoute ou supprime des points, en repartant d'une situation « neutre » d'où l'on aura supprimé le maillage pré-existant¹⁰. Le mécanisme de « mise à jour » du maillage comprend donc plusieurs étapes de délimitation des paroisses (les mailles) et la création et promotion de nouvelles églises paroissiales.

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, telles que celles contenant les agrégats les plus importants, au contraire, il sera plus dense.

— Crédit 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 la probabilité est grande 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,

10. 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 minimales voire nulles.

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 acquiert, on sait que le maillage paroissial se densifie, pour parvenir en fin de période au maillage quasi-communal qui en est hérité aujourd'hui. Cette densification est observée partiellement dans les zones denses, mais aussi très largement et de manière homogène sur l'ensemble du 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 faiblement peuplé dépasse un seuil paramétré, 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 le modèle, 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, elle-même fonction du nombre et du type d'attracteurs qui composent ces pôles. 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. Ainsi, la manière dont ils sont constitués revêt une forte importance. 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 (voir section 2.7.2.2 pour le détail). Par exemple, quand une église paroissiale est située à proximité¹¹ 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. Dans le but de ne pas artificiellement diviser des pôles pré-existants, ou, au contraire, de voir apparaître de nombreux pôles dans un espace restreint, les pôles les plus proches sont fusionnés.

11. 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.

2.3.6 Satisfaction des Foyers Paysans

La mesure de la satisfaction¹² des foyers paysans est le principal déterminant du mécanisme de migration. 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, TANNIER et al. 2017, Tableau 1, p. 309). La satisfaction d'ensemble est une synthèse numérique de ces trois satisfactions spécifiques. Ces composantes sont toutes jugées indispensables. Ainsi, elles ne sont pas pondérées et la plus faible de ces satisfactions sert de base au calcul de la satisfaction d'ensemble¹³.

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 (paysannes, rurales, villageoises, etc.) constituent un groupe suffisamment important 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 assister aux offices et recevoir les différents sacrements (baptêmes, mariages, eucharistie, etc.) qui rythment la vie spirituelle de l'époque. Tout au long de la période, la fréquentation de ces offices religieux augmente en fréquence tout aussi bien qu'en importance sociale, en particulier du fait 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), quand les obligations religieuses deviennent plus lourdes, impliquant de se rendre plus souvent à l'église.

Satisfaction « protection ». Avec la diminution 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

12. 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 « insatisfaction »), dont l'on retrouve le sens dans le terme anglais *dissatisfaction*.

13. 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.

en sont des résultats représentatifs. Ils assurent une protection à la population en cas d'attaques, 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 d'un paramètre complémentaire, le « besoin de protection », qui permet de représenter l'importance du climat de violence, et notamment, la forme de son évolution temporelle.

2.3.7 Migration des Foyers Paysans

Sur l'ensemble de la période considérée, les archéologues ont observé 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, voire 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, pour les foyers paysans, de leurs principaux besoins, qu'ils soient d'ordre matériel, spirituel ou d'intégrité physique. En changeant de lieu et éventuellement en se regroupant, les foyers paysans espèrent trouver un mode de vie plus clément que celui de la génération précédente, par exemple, dans le cas du regroupement, 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. 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, soit tous les 20 ans. La satisfaction est alors à comprendre comme une mesure globale de l'adéquation de la localisation d'un foyer paysan 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 est 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.

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

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

2.3.8 Gains de droits

Les travaux empiriques montrent qu'au fur et mesure de l'avancement de la période, le pouvoir central s'efface et que les ressorts locaux subissent un émiettement important. On voit alors apparaître de nombreux seigneurs de moindre importance, par exemple les chevaliers. 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). La création de ces zones de prélèvement peut concerner les nouveaux seigneurs apparus dans l'espace du modèle, ou 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 du temps.

2.3.9 Collecte des droits

Historiquement, les seigneurs prélevaient des droits auprès de leurs sujets pour différentes raisons : droits de haute et moyenne justice – 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, etc.). Contrairement aux sociétés actuelles, ces droits n'avaient pas nécessairement d'assise 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 entre en jeu.

Dans SIMFEODAL, on a toutefois choisi de modéliser ces droits au travers de représentations géographiques agentifiées de l'emprise spatiale des droits, en l'occurrence en créant des agents-zones de prélèvement. Cette simplification de la complexité empirique ne correspond pas nécessairement aux cas les plus usuels, mais est acceptable aux yeux des thématiciens impliqués dans la construction de SIMFEODAL. Cette vision s'inscrit par ailleurs 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 (voir par exemple JÉGOU 2017) serait sans doute plus appropriée, mais introduirait des paradigmes très différents dans un modèle déjà très complexe.

Les zones de prélèvement 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, etc.).

Chaque droit a ses propres modalités de collecte (voir le détail en section 2.7.4.1). On peut les résumer 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 qui consistait à nommer des gestionnaires ou à 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, pour le remercier de ses services militaires et en faire un allié inféodé par exemple. Dans le système féodal, à travers le don, les seigneurs constituaient ainsi de larges réseaux de vassalité, qui leurs procuraient 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 gardiennage¹⁴. Propriétaire initial et gardien s'enrichissent donc simultanément, ce qui permet de modéliser le gain de puissance économique pour le gardien, et celui de puissance symbolique pour le donateur.

Comme les seigneurs ont dès lors 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 (zones de prélèvement et châteaux) qui ne l'auraient pas encore été. 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 est en effet différente de celle d'un moulin par exemple, et le seigneur récipiendaire sera alors choisi de manière 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 : ainsi, 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) 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 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 s'effectue surtout à partir de la seconde moitié du X^e siècle. Ils sont principalement construits par les grands seigneurs afin de mailler le territoire d'un réseau de protection, bien que certains châteaux soient 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 a été construit entre le X^e et le XIII^e siècle. Les châteaux sont bâtis en bonne partie dans des villes déjà attractives, même si l'on observe aussi quelques créations dans des

14. 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) donne à voir la quantification de ce principe.

espaces peu peuplés, qui tendront ensuite à le devenir (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 fondée 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 cependant 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 de construction de châteaux sont précisées dans la partie section 2.7.4.2.

Parmi les nombreux châteaux construits, on sait qu'il y a une forte hétérogénéité de leurs dimensions, leur importance stratégique et le degré de protection qu'ils apportaient à leur voisinage. 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 car elle n'influe pas véritablement sur les logiques de polarisation ou de fixation du peuplement. D'après les connaissances historiques, on note toutefois que certains châteaux, les plus importants, ont eu un rôle plus remarquable dans la polarisation, du fait qu'ils aient été soit suffisamment importants 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 que la conjonction de ces phénomènes ait renforcé la polarisation.

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 que des agrégats majeurs se développent 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 un « 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, 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'appa-

rition 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 à nouveaux seigneurs

L'émiettement des pouvoirs implique l'apparition, tout au long de la période, de nombreux seigneurs ayant majoritairement une envergure très locale. 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 d'entre eux 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 quasi-constant¹⁵ de nouveaux seigneurs est ainsi créé. Parmi ces seigneurs, seule une faible proportion d'entre eux (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, SANDERS, LIBOUREL et al. 2017; NUNINGER, SANDERS et al. 2017) dans le système de peuplement de l'Europe du Nord-Ouest entre 800 et 1100 est la hiérarchisation du peuplement. On constate ainsi concentration de la population dispersée, avec l'apparition de hameaux, villages et petites villes. Ces concentrations de population suivent une hiérarchie du peuplement au regard de leur taille évaluée la 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.

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 d'un autre d'au plus 100 mètres. Cette définition permet de représenter des entités géographiques très diverses, depuis le petit agrégat composé de

15. 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.

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 ainsi une entité individualisée mais composite.

Certains agrégats peuvent contenir une « communauté » (voir figure 2.3), c'est-à-dire une structure institutionnalisée, gérée par les foyers paysans la composant et procurant un avantage en matière de rapport de force face aux seigneurs 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, à chaque pas de temps, (20%, paramétrable), 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 associé. C'est un problème récurrent des méthodes de *clustering* dynamique que de réussir à mener des associations entre les *clusters* de différentes dates. 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 dans la 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, puisque celui-ci dépend 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, etc.

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 en faciliter l'étude *a posteriori*. Dans SIMFEODAL, nous sommes ainsi obligés de reconstruire les pôles en fin de tour afin d'avoir des sorties exploitables. Cette duplication d'un mécanisme est malheureusement peu optimale, mais elle est nécessaire en raison de 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 décimaux¹⁶. L'enregistrement des données d'un modèle est un problème complexe, dont les enjeux et difficultés sont discutés dans le chapitre 4 (section 4.1).

16. Pour illustrer l'importance de ce traitement d'apparence anecdotique, on peut prendre l'exemple de l'enregistrement des géométries. Celles-ci, dans la plateforme utilisée pour SIMFEODAL, GAMA (TAILLANDIER et al. 2018), 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.

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 ODD visent à l'exhaustivité, et l'ensemble des concepts décrits ne sont pas nécessairement utiles à mobiliser pour la description du modèle 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 soit due à des 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. L'origine thématique et disciplinaire des co-concepteurs de SIMFEODAL, n'est certainement pas étrangère 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 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, 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, mais fait appel à des relations véritablement topologiques dans l'espace. C'est un modèle dont le fonctionnement inhérent est spatial, voire géométrique.

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 dès lors 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 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* » (TANNIER 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 expérience 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 faciliter le dialogue avec des thématiciens. Cette vision « comportementaliste » et individu-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, où la croissance d'une entité est directement proportionnelle à sa taille (BARABÁSI et ALBERT 1999).

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 concourt 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.

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 dix concepts (voir tableau 2.1), nous décrivons brièvement si ils sont appliqués dans SIMFEODAL, et le cas échéant, comment.

Émergence. Ce mécanisme constitue l'un des fondements de nombreux modèles de systèmes complexes, dont SIMFEODAL. La diversité des éléments analysés dans le modèle est trop importante pour établir une liste des éléments qui émergent (voir le chapitre 3, section 3.2.3, par exemple). 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 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 et cette organisation spatiale ne soient inscrites 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, 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 bel et bien adaptation à l'environnement des foyers paysans dans la mesure où ces agents 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.

On préfèrera cependant y attacher 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 maxi-

ser, 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 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 modèles¹⁷ 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 », tels 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 distinguer les interactions directes, où les agents interagissent les uns avec les autres, et des 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 elle se fait par l'intermédiaire d'un autre élément du modèle.

Dans SIMFEODAL, les interactions directes entre agents de même type sont assez minimales : 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 c'est

17. 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).

une interaction effective, dont les éléments atomiques sont 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 ainsi des attributs et comportements propres (une certaine quantité de ressources par exemple), 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, dépendent 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 stochasticité¹⁸. 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, etc.). 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, sans le simuler (cf. chapitre 5, section 5.2 par exemple).

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

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

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 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 partie 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 ODD¹⁹.

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 nombreux indicateurs de sortie hétérogènes²⁰. 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 appréhendés directement pendant leur exécution.

19. 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 ? »

20. Ces problématiques occupent une large partie du chapitre 4 et nous les y expliciterons à cette occasion.

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 une 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 particulier 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 contraignant 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 générericité 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 : tout d'abord, création des églises, ensuite, création 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.

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**²¹ églises, de manière aléatoire dans l'espace du modèle. Pour représenter celles qui sont dotées des droits paroissiaux (environ une cinquantaine au début de la période), on

21. Dans la suite de cette partie, les astérisques indiquent que la valeur indiquée est paramétrable.

procède à un tirage aléatoire d'un tiers** de ces églises auxquelles sont attribués ces droits. 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 importantes en termes de population).

Pour générer la configuration initiale, l'objectif est 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 du premier (voir section 2.3.13 et 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.

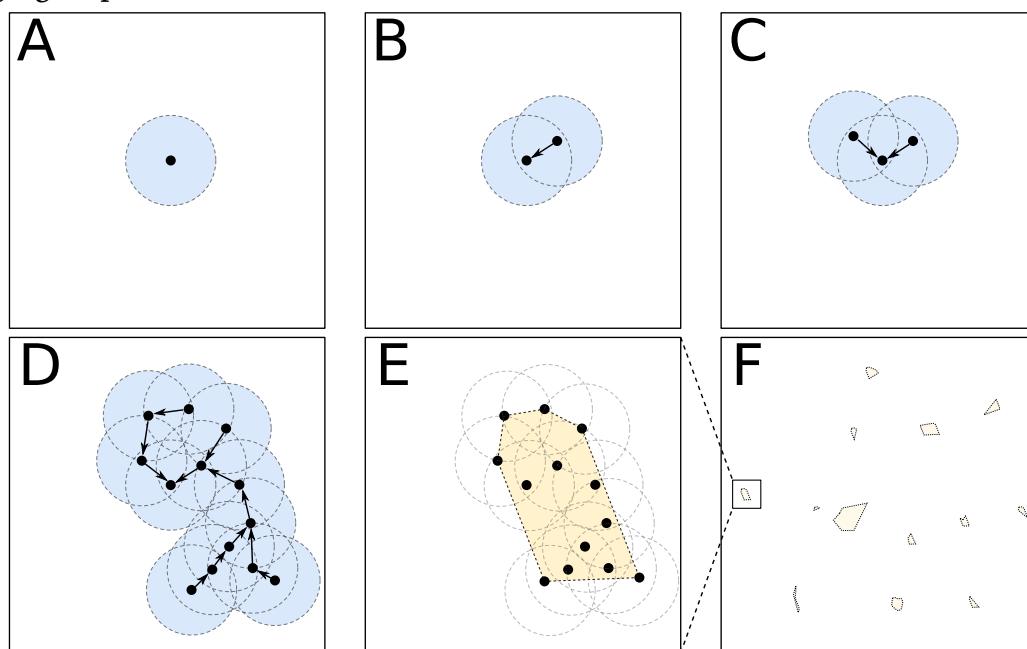


FIGURE 2.7 – Étapes successives de l'initialisation des foyers paysans agrégés (petites villes et villages).

(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 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 tel, 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 dans le modèle implémenté	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 ²²	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 SIMFEODAL.

22. 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. 101.

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 gérée 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 remplit le même rôle (voir chapitre 3, section 3.3.1.3). 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 ne peut 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 publiquement²³ et 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. Cela n'enlève en rien, en revanche, de notre point de vue, à l'importance 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. 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 de création des paroisses ; puis les mécanismes relatifs aux 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 implantés 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) –, 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

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

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 SIMFEODAL.

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 « probabilité 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 de 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 fonde 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, dans le cadre d'une description discursive, il sera souvent plus aisé de présenter les sous-processus de manière développée plutôt que factorisée pour bien différencier les étapes successives.

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 ainsi bien plus rapide de calculer cette mesure depuis les châteaux, puis de sélectionner la distance minimale pour chaque couple (foyer paysan; château). On voit donc bien dans cet exemple que l'implémentation se fait dans un sens opposé à celui du discours, sans que cela ait la moindre conséquence sur le plan conceptuel.

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.   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 au regard de telles ou telles conditions vis-à-vis des agents.

2.7.2.1 Identification des agrégats

La figure 2.8 présente les étapes successives de détection des agrégats.   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 distance²⁴ : 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**).

24. L'opérateur GAMA simple_clustering_by_distance, proche conceptuellement de l'algorithme DBSCAN.

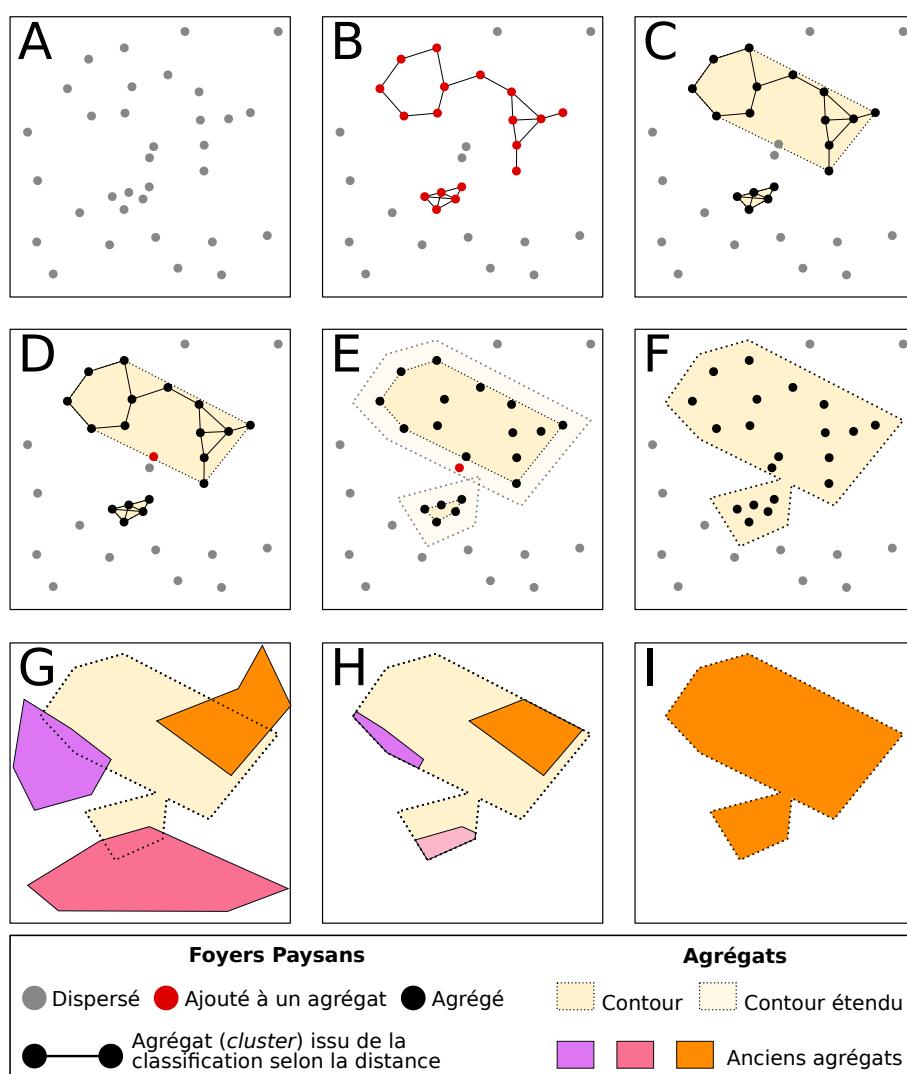


FIGURE 2.8 – Détection des agrégats et identification de leur « héritage ».

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 en réalisant 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 (l’agrégat orange dans l’étape 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). 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.

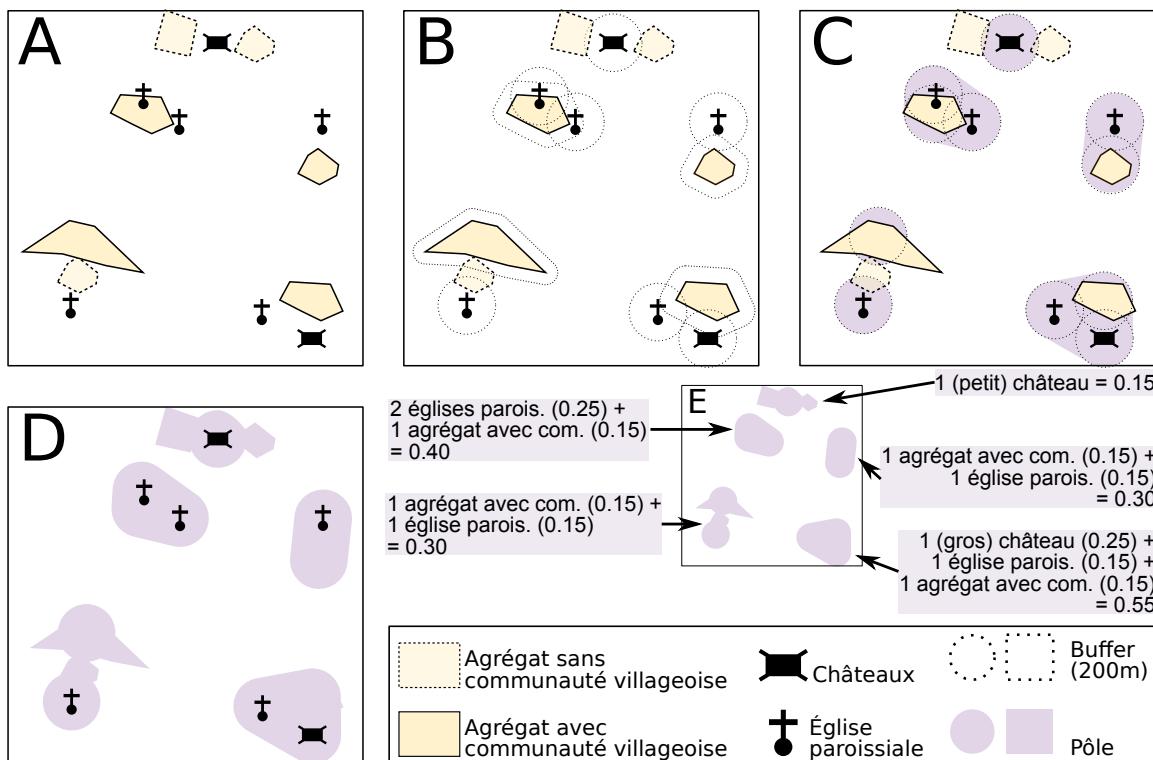


FIGURE 2.9 – Les étapes du mécanisme de détection et de calcul d'attractivité des pôles.

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 qui 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 composites. 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 enfin calculer leur attractivité à partir des seuils définis dans le 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 de droits paroissiaux, qui sera promue et deviendra 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'agrégrats sont présents, la population des foyers paysans doit aussi être desservie par des églises paroissiales. 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 « insatisfaisantes » (A, B, C et D, voir figure 2.10).

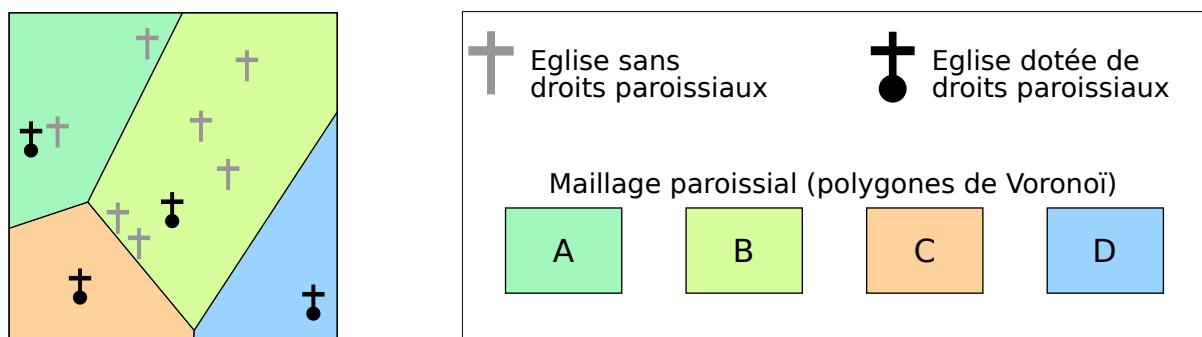


FIGURE 2.10 – Quatre exemples de paroisses insatisfaisantes.

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

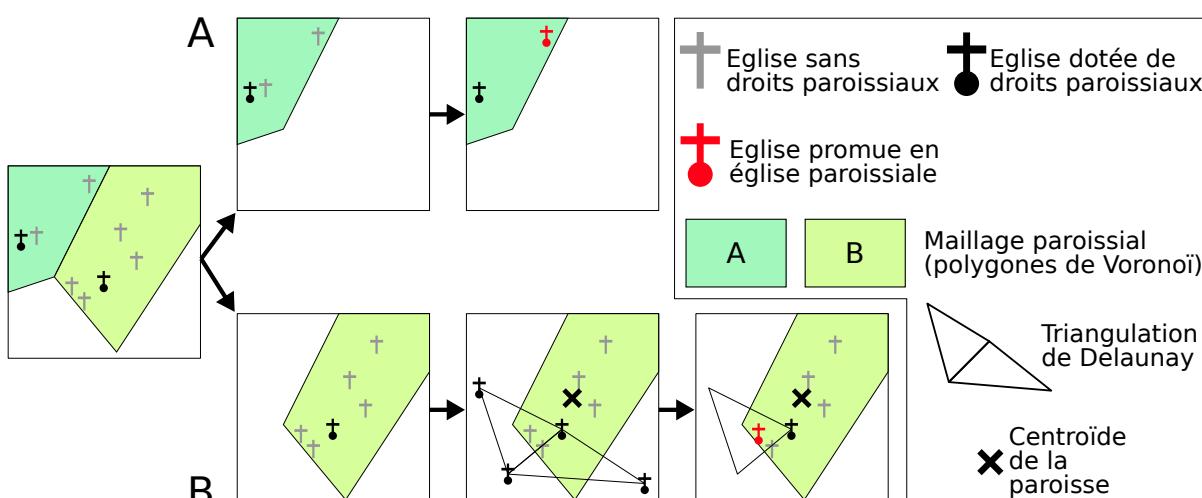


FIGURE 2.11 – Promotion d'églises paroissiales avec églises non paroissiales.

- 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 réalise une triangulation de Delaunay autour de toutes les églises paroissiales (les églises **A**, **B**, **C** et **D**, visibles dans la figure 2.10).

Puis, on sélectionne le triangle résultant qui est le plus proche du centroïde de la paroisse.

Enfin, on promeut en église paroissiale l'église la plus proche du centre de ce triangle et appartenant à la paroisse.

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).

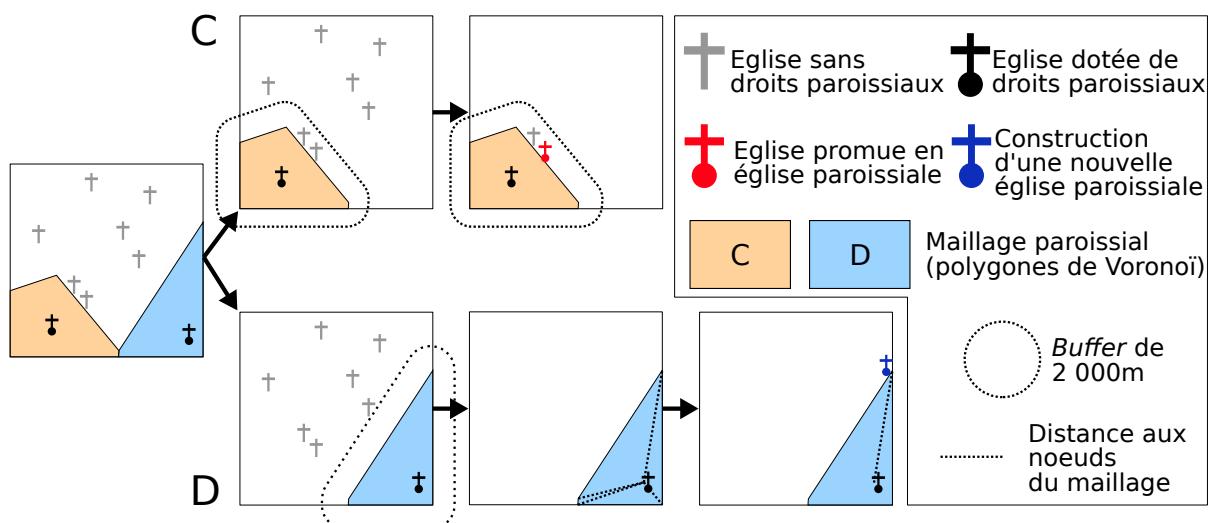


FIGURE 2.12 – Promotion et création d'églises paroissiales dans des paroisses n'ayant initialement pas d'églises sans droits paroissiaux.

Dans ce cas de figure, on cherche les églises non paroissiales situées dans un rayon de 2000 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.
- S'il n'y a aucune église non paroissiale dans ce *buffer* de 2 000 m (**D**), on bâti une nouvelle église.

Celle-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 distance (*distance_max*), sa satisfaction est nulle (*satisfaction* = 0). Entre ces deux seuils, minimal et maximal,

la satisfaction suit une logique gravitaire simple, associée à une décroissance linéaire. L'équation 2.1 permet de formaliser ce type de calcul, et la figure 2.13 illustre cette relation.

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

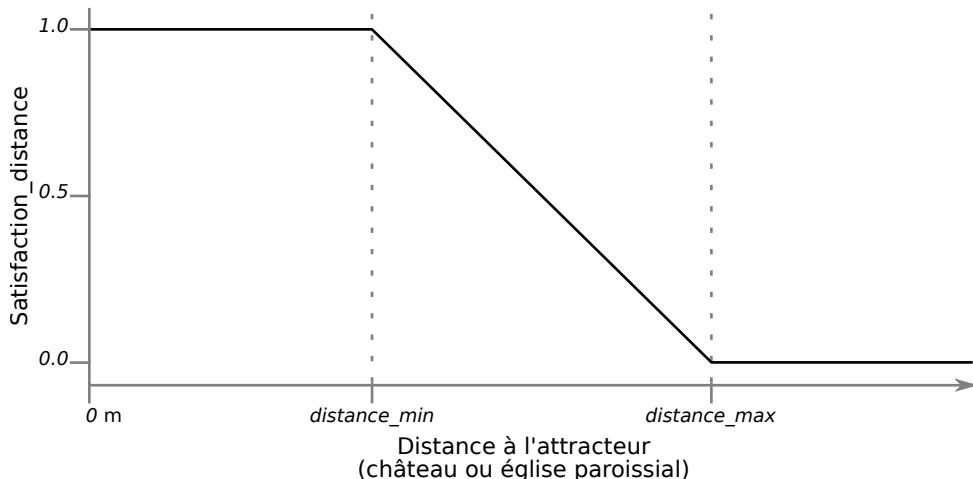


FIGURE 2.13 – Variation de la satisfaction en fonction de la distance à l'attracteur le plus proche.

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 :

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

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

Satisfaction « protection ». La satisfaction « protection » mobilise une logique semblable, 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 : $besoin_protection = 0.2; 0.4; 0.6; 0.8$ (augmente de 0.2 à chaque pas de temps)
- 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 modélisée²⁵. Cela permet d'intégrer le rôle croissant, connu empiriquement, des communautés paysannes.

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

avec

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

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'équilibreront pas. Une « satisfaction protection » forte ne compensera pas une forte insatisfaction religieuse par exemple. En revanche l'appartenance du foyer paysan à une communauté 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 $[appartenance_communaute] \in \{0; 1\}$

25. *puissance_communauté* vaut 0.2 jusqu'en 1060, puis augmente de 0.2 à chaque pas de temps pour atteindre 1 en 1140 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 qui a été le plus modifié 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 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. section 1.3.2), 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).

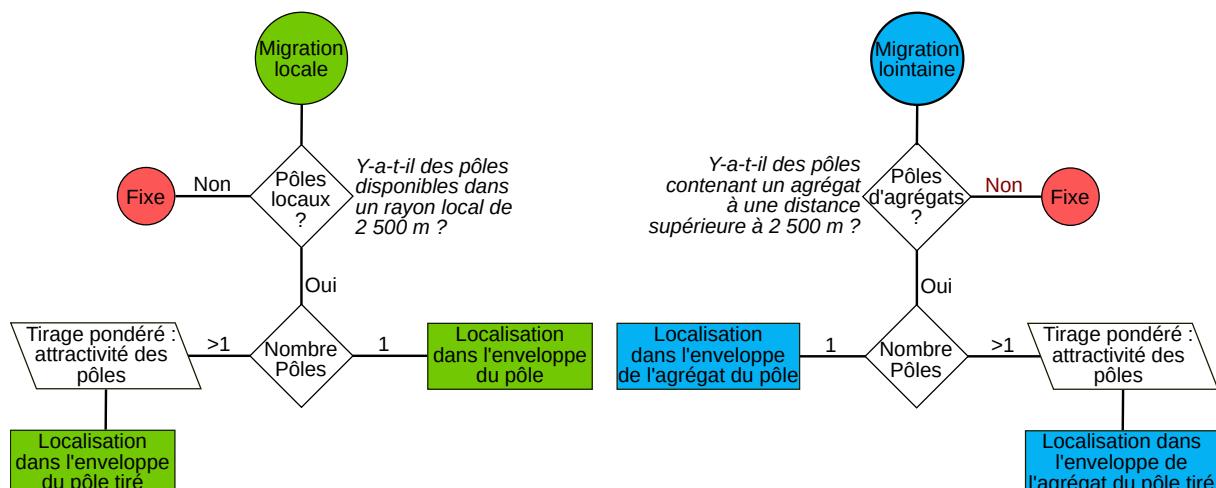


FIGURE 2.14 – Migrations locales et lointaines.

Pour aboutir à cette différence entre migration locale et migration lointaine, la règle repose sur le fait que les foyers paysans privilégiennent 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 qu'un foyer paysan déjà agrégé cherchait un agrégat potentiellement plus attractif, afin de voir sa satisfaction augmenter, tandis qu'un foyer paysan dispersé cherchait avant tout à rejoindre un agrégat, en faisant preuve de moins d'exigence dans son choix.

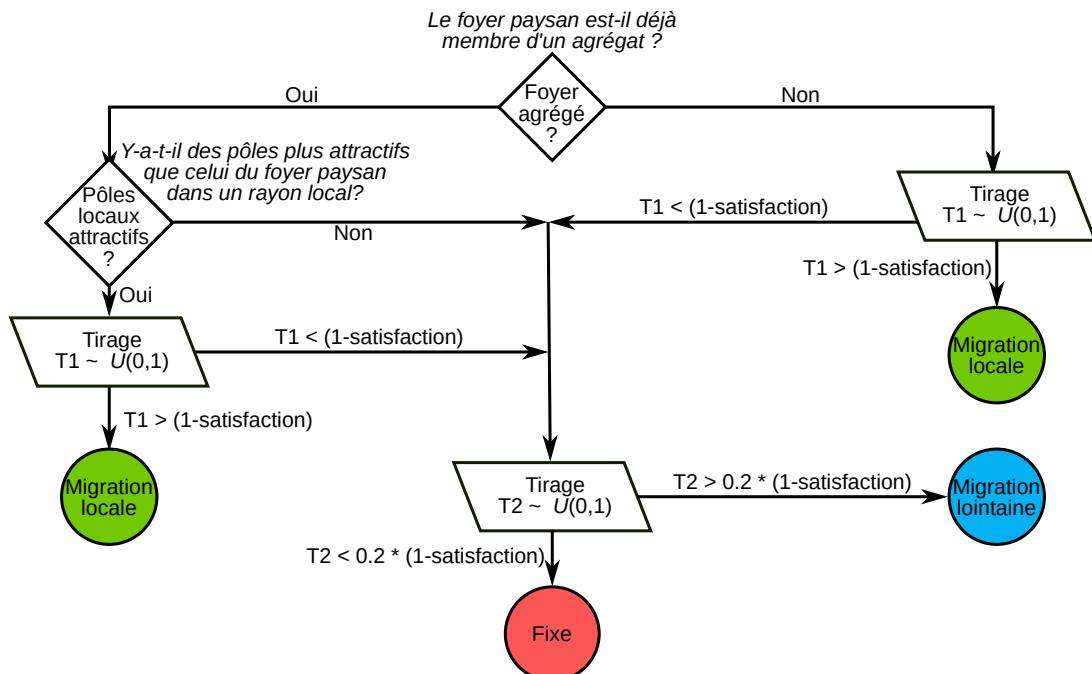


FIGURE 2.15 – Décision de migration.

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.

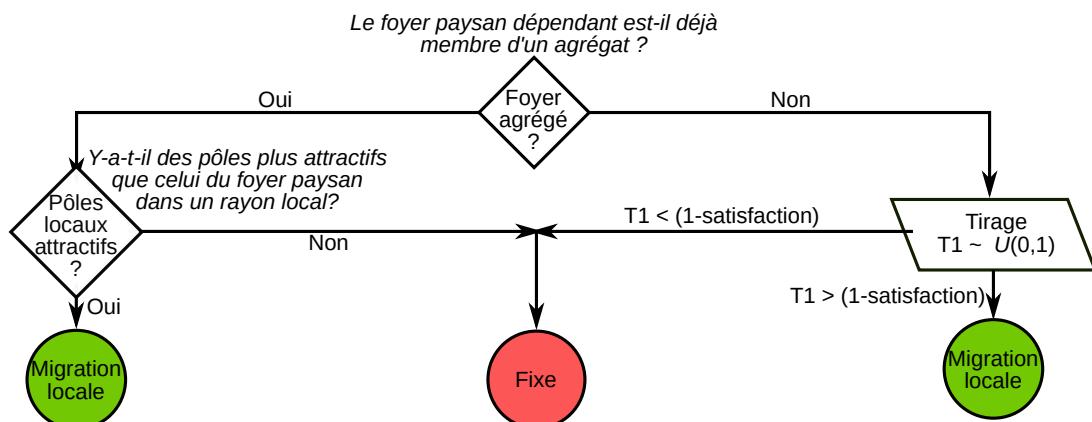


FIGURE 2.16 – Décision de migration des foyers paysans dépendants.

2.7.4 Seigneurs

2.7.4.1 Prélèvement des droits

Les seigneurs, petits et grands, collectent les taxes 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 localisation²¹, un rayon²² et un taux de prélèvement²³.

Les prélèvements rapportent de la « puissance » aux seigneurs, différenciés selon les types de droits (tableau 2.5).

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 par la figure 2.17.

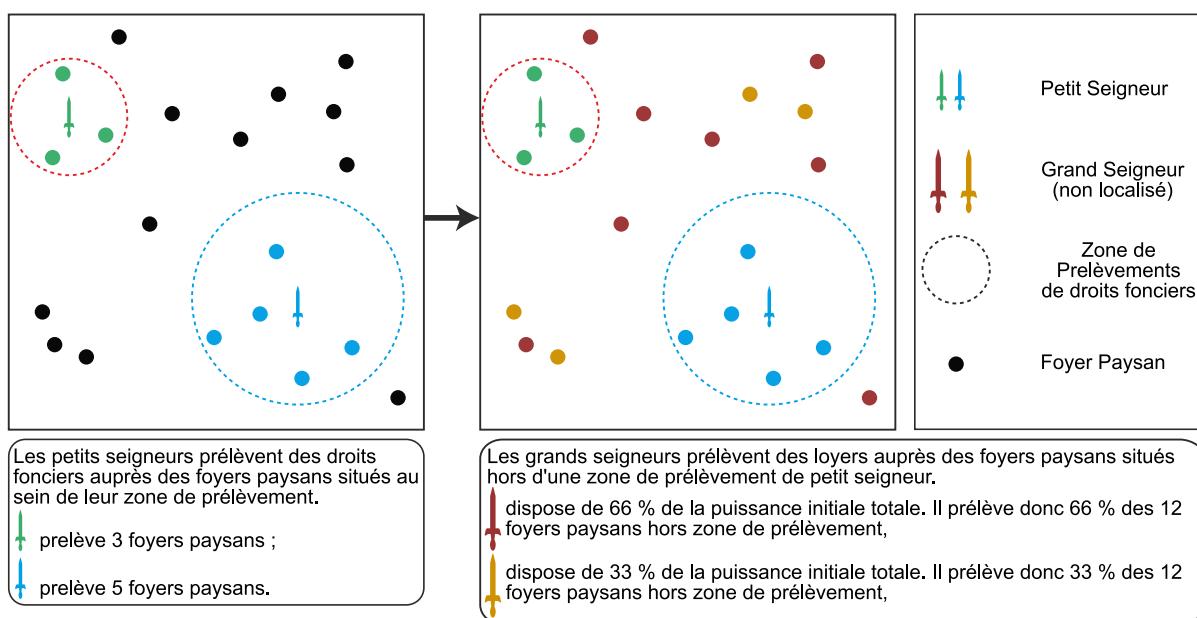


FIGURE 2.17 – Prélèvement des droits fonciers par les petits et grands seigneurs.

21. Pour les petits seigneurs, il s'agit de leur propre localisation

22. 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

23. 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.

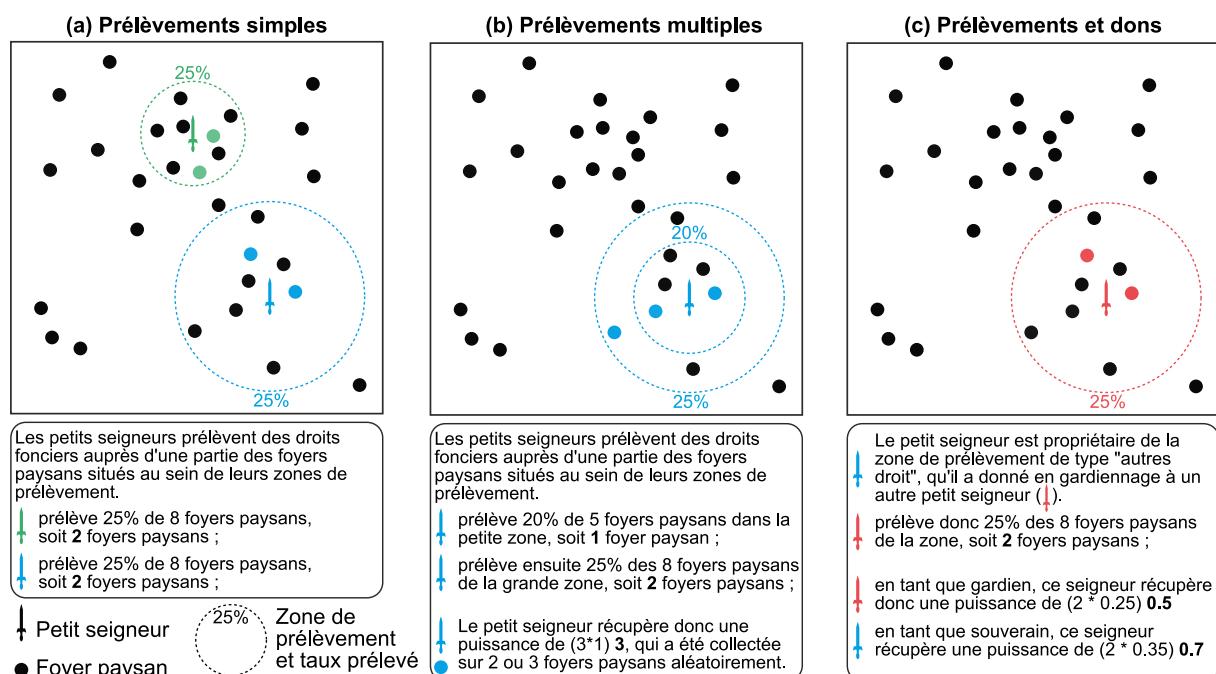


FIGURE 2.18 – Mécanisme général de prélèvement des droits par les seigneurs.

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 3 000 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 :

$$P(\text{construction}) = \frac{\text{puissance_seigneur}_i}{\sum \text{puissance_seigneur}_{1..n}} \times \text{ponderation_proba_chateau}$$

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.

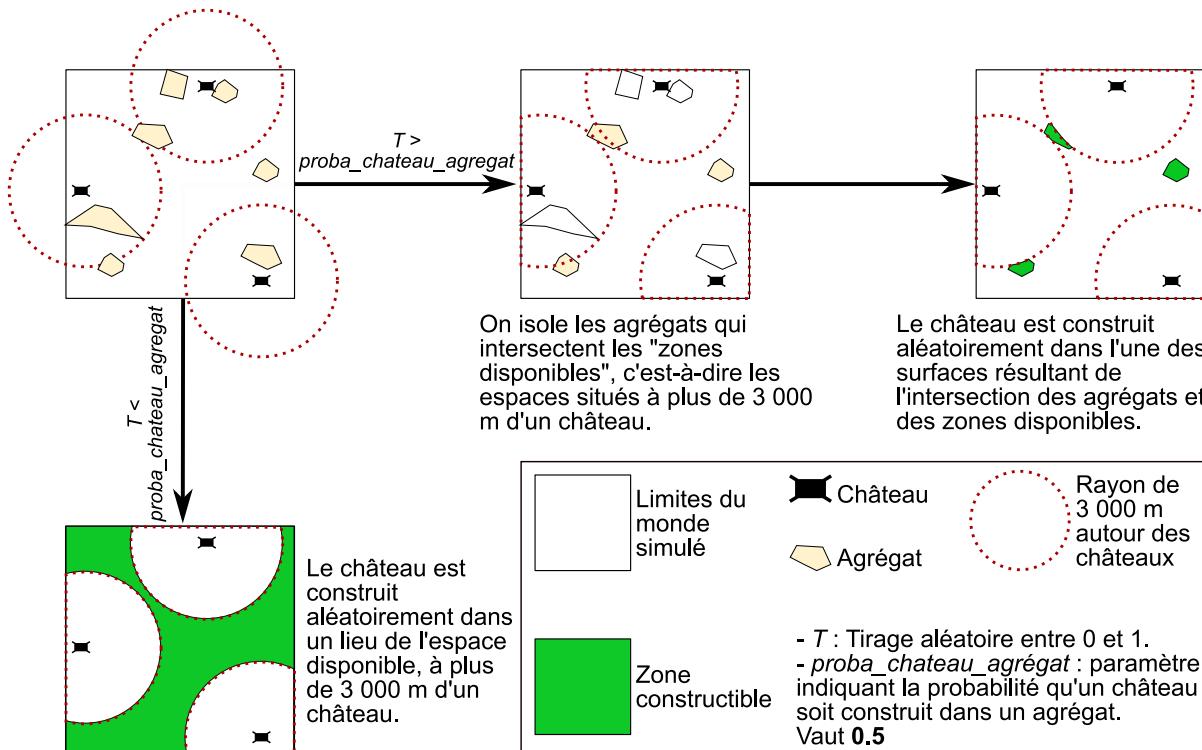


FIGURE 2.19 – Mécanisme de localisation des châteaux construits.

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 que les prélèvements y sont 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 par à un rayon, lui aussi, supérieur. Ce dernier est variable et dépend de la puissance relative du seigneur qui construit le château. Plus précisément, le 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

Le protocole de description ODD, suivi tout au long de ce chapitre, présente l'avantage indéniable de forcer les modélisateurs à harmoniser les présentations de leur modèle. Cette harmonisation est « interne », en ce que le 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). Mais l'harmonisation est aussi « externe », chaque section poussant à positionner son modèle vis-à-vis d'autres modèles de simulation à base d'agents de la littérature, par exemple dans la partie des « concepts de modélisation » (section 2.4), où le rapport des agents à l'environnement spatial ne peut être appréhendée qu'en comparaison avec des modèles connus.

Le prix de cette générnicité et de cette contextualisation est une certaine inadaptation à certains modèles. La dernière partie de ce chapitre, consacrée à la présentation détaillée de certains mécanismes, montre ainsi à quel point le protocole de description ODD peut être difficile à mobiliser pour des modèles descriptifs et exploratoires comme SIMFEODAL. Cette difficulté de présentation du modèle dans le cadre d'ODD est renforcée par la forte hétérogénéité, en termes de complexité²⁴, 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 liés aux parcours et sujets de recherche individuels des thématiciens impliqués dans la construction du modèle. 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 comporte sans doute plus de résultats que l'utilisation d'un état « final ».

En dépit de cette forte hétérogénéité dans les mécanismes, il nous semble en revanche important de pointer aussi la certaine générnicité qui en caractérise les fondations. Par exemple, le calcul des différentes composantes de la satisfaction 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 générniques, 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 particuliers et semblent fortement variables d'un cas à l'autre (migrations locales ou lointaines, migrations des foyers paysans « mobiles » ou « dé-

24. 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.

pendants »), 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* (soit $1 - satisfaction$).

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 aussi 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'interdisciplinarité

Sommaire

Introduction	108
3.1 Comment évaluer un modèle ?	109
3.1.1 Évaluation, validation, vérification...	110
3.1.2 Les étapes de l'évaluation d'un modèle	113
3.1.3 Une évaluation de la plausibilité d'un modèle : la « <i>face validation</i> »	119
3.1.4 Vers une évaluation visuelle	128
3.2 Une grille d'analyse composée d'indicateurs de sortie	132
3.2.1 Indices et indicateurs	132
3.2.2 Hiérarchiser et catégoriser les indicateurs	138
3.2.3 Les indicateurs et dimensions de SimFeodal	142
3.3 Paramétrage du modèle SimFeodal	151
3.3.1 Les paramètres	151
3.3.2 Le paramétrage	162
Conclusion	180

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté un modèle, SIMFEODAL, dont l'objectif est de répondre à un questionnement thématique (section 2.1.2) portant sur 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, on procède à une « évaluation » du modèle. Cette évaluation prend appui sur un ensemble de critères : plus ceux-ci sont remplis, meilleure sera l'évaluation, et plus le modèle sera jugé satisfaisant.

L'évaluation est un domaine incontournable et fortement étudié dans le champ de la modélisation, quel que soit le type de modèles sur lesquels cette évaluation porte. 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 entièrement sur des connaissances expertes sur des sociétés du passé plutôt que sur des données directement observables. Cela en complexifie l'évaluation, car les approches classiques sont peu adaptées à ce type de modélisation interdisciplinaire guidée par la théorie et où les données empiriques sont lacunaires. Il est en effet difficile de quantifier le comportement attendu du modèle, ce qui procure habituellement la référence quantitative pour mesurer la qualité du modèle.

Les difficultés liées à l'évaluation du modèle sont renforcées par l'objectif et le mode de construction mis en place pour SIMFEODAL, qui 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 sans que ce processus n'ait nécessairement un terme.

Dans le chapitre précédent, nous décrivions par exemple une « version » du modèle, intitulée « version 6.3 », qui montre l'existence d'au moins 5 versions préalables, et sans doute bien plus de « sous-versions ». Ce chapitre vise 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, à partir des retours réguliers de l'évaluation du modèle.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu la démarche globale d'évaluation, et en particulier une proposition de méthode fondée sur l'« évaluation visuelle » de modèle au moyen d'une grille de critères – adaptée aux modèles du type de SIMFEODAL. Nous spécifierons cette approche en l'appliquant au cas de SIMFEODAL, c'est-à-dire en présentant les critères retenus pour l'évaluation du modèle. Nous décrirons ensuite le paramétrage du modèle, son articulation avec l'évaluation, et nous mènerons 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, VAN DEN BRINK et GRIMM 2014; REY-COYREHOURCQ 2015), la plupart des chercheurs mettent en avant qu’un modèle de simulation non évalué n’a 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 exploratoire, en particulier par la dimension heuristique qui le caractérise : les résultats produits par le modèle n’ont pas vocation à être mobilisés directement, ce sont des supports à la synthèse et à la ré-organisation de connaissances expertes sur le cas d’étude analysé. 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 perdrat 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 classification des concepts mobilisés, non pas par convention, 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 (SHS).

Depuis les travaux fondateurs, dans les années 1960, la logique qui consiste à éprouver un modèle – c'est-à-dire à vérifier qu'il correspond correctement d'une part (1) 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 (*verification*) (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 si ce n'est que la *verification* de NAYLOR comporte un aspect plus « binaire » sur ce qui est ou non vérifié (REY-COYREHOURCQ 2015, p. 137). 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 intervertis, comme un recensement rigoureux des usages le démontre (AUGUSIAK, VAN DEN BRINK et GRIMM 2014). Dans cet article, les auteurs mènent une méta-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 » (ibid., p. 120).

Les auteurs de cette étude identifient par ce constat les besoins d'une nouvelle terminologie, univoque et explicite, permettant de dépasser notamment les successions 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 –

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

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

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

explicitement définis (*ibid.*, 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).

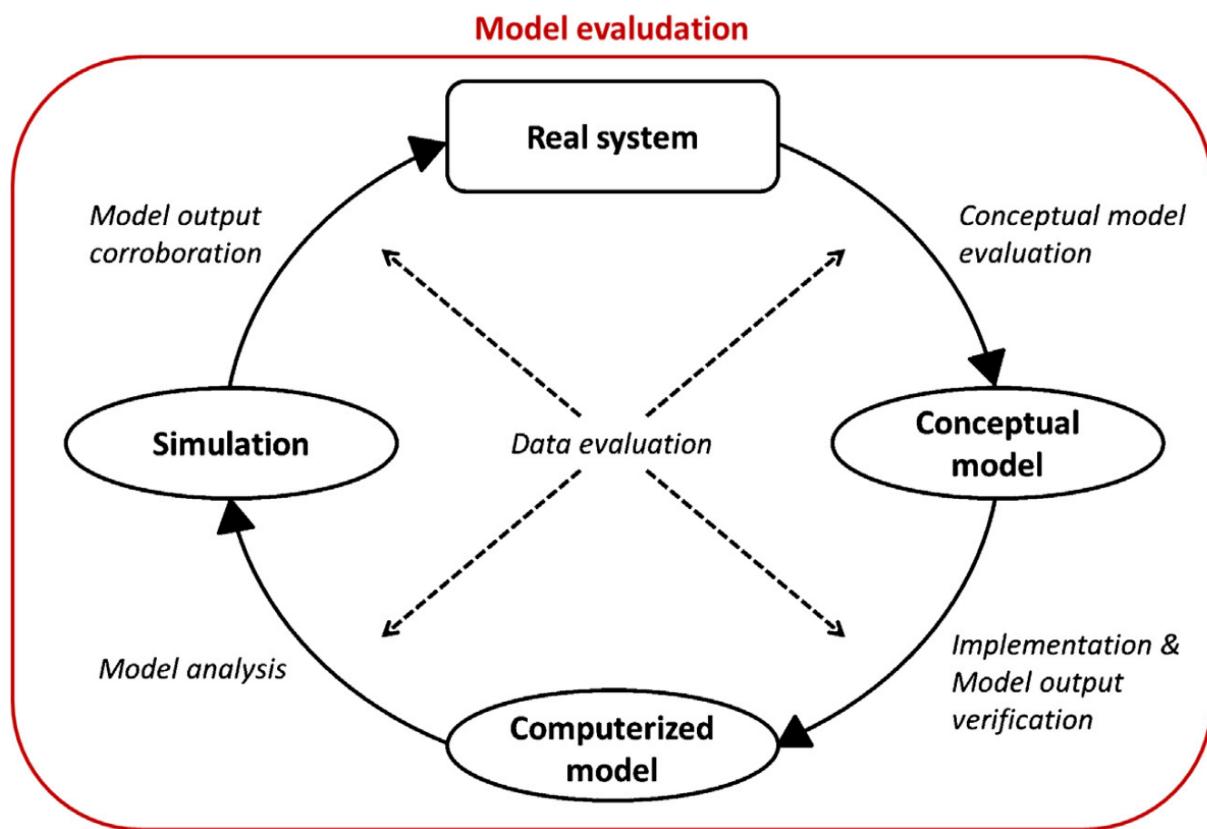


FIGURE 3.1 – Représentation schématique du cycle de modélisation et de la typologie des termes relatifs à l'évaluation de modèle, dans AUGUSIAK, VAN DEN BRINK et GRIMM (2014, Fig. 1, p. 121)

Dans ce schéma, il est intéressant de noter que le terme de « validation » n'est nulle part employé (si ne n'est dans le mot-valise *evaludation*), au contraire de celui d'« *evaluation* », omniprésent. Les auteurs se détachent de l'usage de « *validation* » en raison de la connotation très positiviste et « binaire » de ce mot : elle peut impliquer qu'un modèle est soit valide, soit invalide, loin du gradient qu'accepte l'évaluation. Notons que l'item central du schéma, l'évaluation des données (*data evaluation*) qui intervient pour l'évaluation de chacun des types de modèle, a une signification plus ouverte qu'on ne pourrait l'entendre au sens premier. AUGUSIAK, VAN DEN BRINK et GRIMM (*ibid.*, p. 121) y incluent ainsi les connaissances extraites des données en tant que telles, comme définit dans la méthodologie « POM » (*Pattern-Oriented Modeling*), qu'ils citent ici. « The term “data” also refers to patterns (GRIMM et RAILSBACK 2012) or, in economists’ terminology, “stylised facts”, which are general trends and signals in data, observations, and empirical knowledge. »

Nous partageons absolument la reconnaissance du 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, très peu d'auteurs en font un usage en français, et surtout sous la forme de recension plus que d'utilisation du concept (par exemple REY-COYREHOURCQ 2015, p. 89,436).

Par soucis d'homogénéité et de compréhension par le 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 (*ibid.*), on emploie le concept d'**évaluation** pour définir l'approche d'ensemble. On distingue alors la « **validation interne** » – correspondant à la *verification* définie par BALCI (1994), c'est-à-dire s'assurer de la bonne conception du modèle, et la « **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.

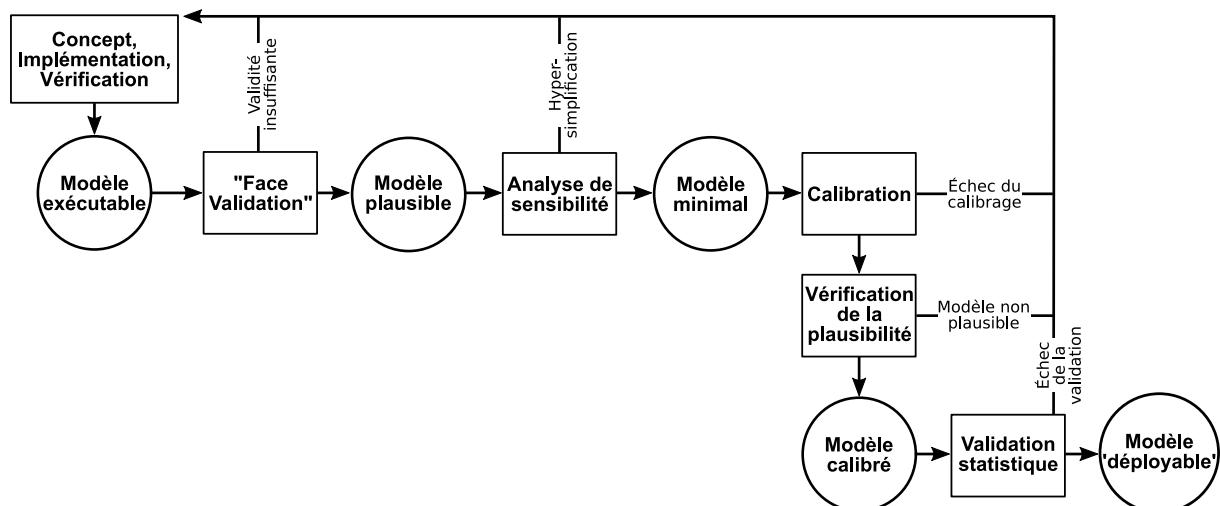


FIGURE 3.2 – Une esquisse de procédure générale de validation de modèles de simulation à base d'agents, traduit d'après KLÜGL (2008, fig. 1 p. 42)

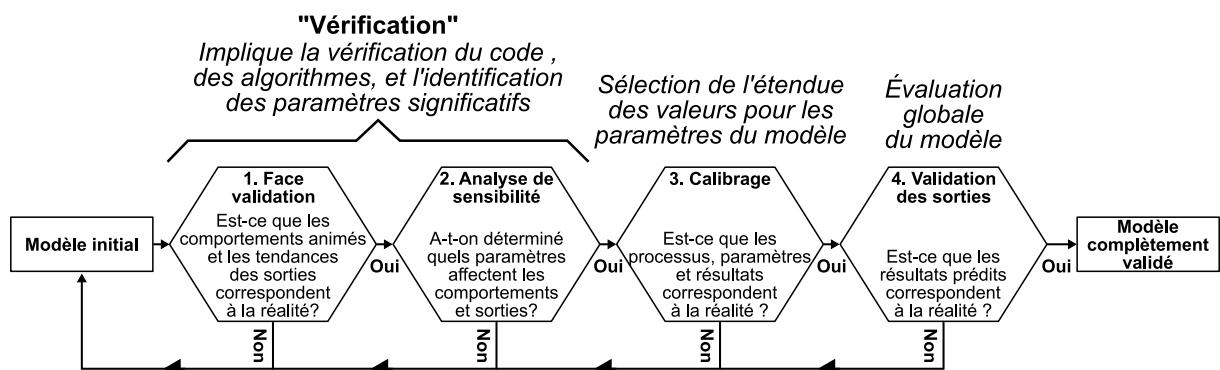


FIGURE 3.3 – Une procédure générale de validation d'un modèle à base d'agents, traduit d'après NGO et SEE (2012, fig. 10.1 p. 183)

« **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 observées) et l'issue (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

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

interne que de la validation externe. Nous reviendrons plus longuement dans les pages suivantes (voir section 3.1.3) sur cette étape essentielle d'après l'avis partagé dans la littérature mais néanmoins largement sous-exploitée et méjugée à notre avis.

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 avancées⁸, les valeurs des différents paramètres du modèle, on peut observer l'influence de chaque paramètre sur le déroulement du modèle. Cette procédure, 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 sa contre-partie implémentée. En effet, 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, ou au moins de le considérer comme un artefact thématique sans importance effective. 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 au regard des résultats produits par la simulation du modèle ainsi calibré. 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 là 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

8. Un point plus précis y est consacré dans le chapitre 5, section 5.2.

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

une boucle infinie 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 à « améliorer » le modèle plutôt 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'isolement 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 quiconque 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, et l'on cherche à minimiser cet écart : plus l'écart est faible, 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 empiriques dès le début de la conception du modèle. À 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'agents, cas dans lequel nous nous ins-

crivons 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 extrêmement difficile 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 que l'on fait appel à de la modélisation à base d'agents quand on ne peut plus 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) sont parvenus à résoudre de manière analytique un modèle foncièrement 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.

Remarquons tout de même que tout cet effort de résolution analytique n'invalider pas pour autant l'usage du modèle de simulation à base d'agents en lui-même. Ainsi, pour AXTELL (2000), même quand un modèle est « résolvable » analytiquement (ou partiellement résolvable), la simulation à base d'agents constitue tout de même un atout, notamment en matière de dissémination des résultats du modèle :

« Yet another role for agent-based computing occurs in the (increasingly unusual) case in which a model of a social process can be solved explicitly. Here it would seem that there is no role whatsoever for agent computing, since the solution is completely specified. However, even in this case there is utility for creating an agent-based implementation of the formal model. Most people outside academia have modest knowledge of mathematics and statistics, and therefore have a difficult time interpreting numerical model output, or understanding regression results, for example. But people are very good at pattern recognition and analogical reasoning. Because the

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, MATHIAN et al. 2017, Annexe 2, « Retour sur les SMA comme outil et cadre conceptuel de modélisation. », pp. 479-482)

output of agent models tends to be visual, such models can be very effective at depicting formal results from mathematical models. Such uses of agents are especially relevant for demonstrating technical results to policy-makers and business decision-makers. »

AXTELL (*ibid.*, p. 7)

Notons enfin que pour certains auteurs, dont l'un des pionniers de la modélisation à base d'agents en SHS, 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 partial 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 (*ibid.*, p. 1590-1591)

Notons tout de même une dernière piste, intermédiaire, qui permet d'approcher de l'analyse formelle de modèles à base d'agents. Un collectif de chercheurs a conçu un modèle descriptif et complexe de la participation électorale en partant des comportements individuels des électeurs (EDMONDS, LESSARD-PHILLIPS et FIELDHOUSE 2015; FIELDHOUSE, LESSARD-PHILLIPS et EDMONDS 2016, « Modèle 1 »). En accord avec les principes de la modélisation KIDS (EDMONDS et MOSS 2005), proposé par l'un des membres de ce collectif, les chercheurs ont ensuite procédé à une large simplification du modèle, notamment en réduisant une partie de ses aspects les plus spécifiques (réseaux sociaux des électeurs et différenciation des partis politiques entre autre) (LAFUERZA et al. 2016a, « Modèle 2 »). En repartant de cette version parcimonieuse du modèle, les chercheurs ont alors re-construit une nouvelle version du modèle, encore plus parcimonieuse et analysable de manière formelle (LAFUERZA et al. 2016b, « Modèle 3 »). Après avoir démontré les liens entre le modèle 1 et le modèle 2, puis entre le modèle 2 et le modèle 3, les auteurs ont pu montrer à l'aide de l'évaluation formelle du modèle 3 que certains mécanismes du modèle 1, empiriquement pensés importants, n'avaient en fait qu'un effet très modéré. LAFUERZA et al. (*ibid.*) s'appuient sur cette expérience pour démontrer l'utilité de la méthode KIDS vis-à-vis du respect qu'elle permet de conserver vis-à-vis des connaissances expertes :

« One of the most compelling [advantages of this method] is that it combines the best of two worlds : the simplicity appreciated by those trained in the physical sciences, but having an input from the many effects included in complex models. A central point is that, although the models constructed

through this procedure are ‘simple’, in the sense that they have far fewer parameters than the models they are derived from and are more amenable to analysis, they will typically have features that would not have been guessed at if one started from simple models and then added further complexity. This is the strength of the approach : Model 1 contains within it a large amount of social science data and expertise, and a diluted form of this is retained in Model 3. »

LAFUERZA et al. (2016b, p. 6)

Dans l’absolu, une telle expérience demande une énorme quantité de travail, et sans aller jusque là, on peut chercher à approcher d’une validation formelle sur un modèle complexe de manière directe, c’est-à-dire sans passer par des modèles intermédiaires. Il est ainsi possible d’analyser le comportement d’un modèle de manière globale, c’est-à-dire en explorant l’ensemble de ses comportements possibles. On peut pour cela user de méthodes basées sur du calcul intensif qui visent à cartographier « l’espace des sorties » d’un modèle. C’est par exemple l’un des enjeux principaux, en matière de recherche, d’une plateforme telle qu’OpenMOLE (REUILLO, LECLAIRE et REY-COYREHOURCQ 2013), dont une partie des algorithmes (par exemple CHÉREL, COTTINEAU et REUILLO 2015) cherche à traverser l’espace des sorties de la manière la plus efficiente possible, c’est-à-dire en cherchant à réduire le nombre de combinaisons de paramètres possibles – gigantesque en raison de l’explosion combinatoire – via des solutions d’optimisation.

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 méthodes¹¹. Il est évident à la lecture des auteurs historiques du champ (par exemple les précurseurs cités 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 »¹². 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’*inputs* et d’*outputs*, il nous semble que toutes les méthodes,

11. « [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.

12. « 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).

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 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), on peut par exemple faire varier chacun d'entre eux selon une granularité de dix valeurs, et tenir compte de l'aléa en menant dix réplications pour chaque combinaison de paramètres. L'analyse de sensibilité comportera déjà ($10^3 \times 10$) 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 rapidement le milliard...

Pour de tels modèles, malgré tout assez peu complexes 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 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. Au contraire, nous considérons que dans ces cas, des méthodes de « *face validation* » peuvent être utiles et suffisantes pour évaluer un modèle de simulation. Une des conditions est que ces méthodes soient menées de façon systématique et en suivant un protocole précis. Après avoir défini de manière plus approfondie ce qu'est la *face validation*, nous formulerez ensuite une proposition d'un tel protocole, intitulé « évaluation visuelle ».

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 sciences de l'éducation (NEVO 1985). Le concept est discuté et disputé dans ces domaines (MOSIER 1947), mais on y attribue, pour les modèles statistiques, une double nécessité. Il s'agit que le modèle présente une validité à l'épreuve des données tout en ayant une apparence de validité, c'est-à-dire

qu'il semble plausible.¹³.

Pour illustrer ce besoin de « plausibilité », on peut prendre l'exemple des problèmes de corrélations fallacieuses (ou « *spurious correlations* »). À la suite d'un article (SHAW 2017) liant l'utilisation de glyphosate et le 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*¹⁴. Celui-ci 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).

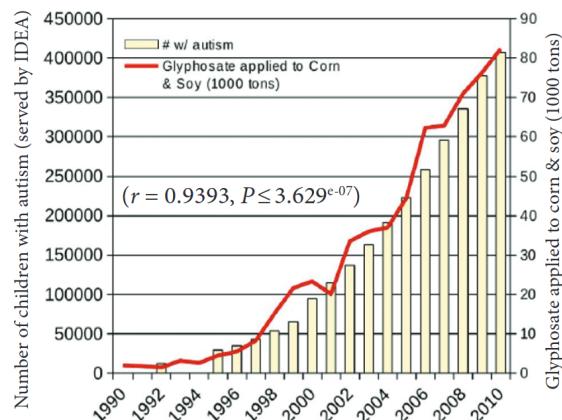


FIGURE 3.4 – Relation entre autisme et utilisation de glyphosate, d'après SHAW 2017, Figure 2, p. 51

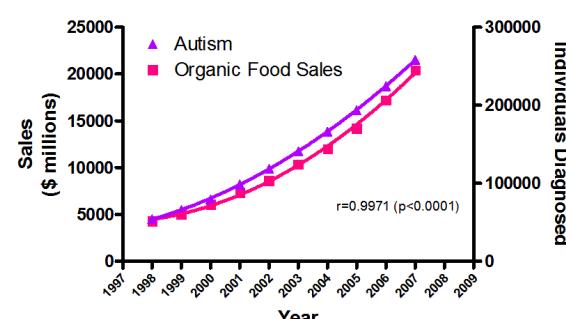


FIGURE 3.5 – Relation entre autisme et vente d'aliments « bio », d'après « jasonp55 », 2012.

En termes de qualité de l'ajustement, le second modèle est meilleur : 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 épidémiologiste pourra en effet rejeter les conclusions du second graphique en se basant sur son intuition face à l'absence de relation empirique, au niveau individuel, entre autisme et alimentation biologique. Cet exemple, trivial, illustre le besoin d'une évaluation basée sur la plausibilité, quand bien même une mesure de la validité aurait déjà été effectuée et jugée concluante.

C'est à cette évaluation de plausibilité que correspond, dans les figures 3.1 et 3.2 notamment, l'étape de « *face validation* ». L'utilisation très polysémique – et donc contradictoire – de ce terme, et les importants débats autour de son usage ayant poussé à sa désuétude¹⁵, on le retrouve pourtant au cœur de l'un des articles fondateurs de l'évaluation de modèles de simulation, où HERMANN le définit ainsi :

13. « 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, 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)

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

15. 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. »

« Face validity is a surface or initial impression of a simulation or game's realism. Probably no approach to model validity is reported 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 modélisé¹⁶. 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 plateformes de modélisation à base d'agents pour qu'une autrice, 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*,

16. On retrouve l'expression de « people knowledgeable about the system » chez BALCI (1994, p. 130), et KENNEDY et al. (2006, p. 2) parlent de « domain experts ».

chacune pouvant être menée par des experts différents¹⁷ :

Composantes de la *face validation*.

- **Évaluation du déroulement.** Ce type d'évaluation vise à analyser le 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 vérifications 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 plausibilité des trajectoires individuelles. 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 (cf. chapitre 2), les comportements individuels des foyers paysans ne reposent pas sur des hypothèses de vraisemblance : le foyer paysan qui se déplace de ville en ville, parfois en faisant des allers-retours, au cours des 300 ans modélisés, ne s'appuie sur aucune connaissance empirique, et tendrait même à contrevir aux connaissances expertes de la mobilité résidentielle des foyers paysans médiévaux. On pourrait y voir une « métaplausibilité » inter-générationnelle, mais il serait difficile de l'interpréter et surtout de

17. L'énumération qui suit est une traduction libre et une reformulation partielle de KLÜGL (2008, p. 41-42)

la différencier d'autres comportements de foyers paysans. Le suivi d'un foyer paysan, isolé de ses co-agents, au cours du déroulement du modèle, par un expert thématique, 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, bien que peu adaptée à certains types de modèles, peut toutefois s'avérer utile, de manière universelle, en matière d'évaluation interne, vu alors comme un outil de « débugage ». Même si les réactions et attributs des agents ne reproduisent pas une connaissance experte, leur observation 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, il est possible d'y répondre ainsi :

- **Manque de connaissance experte.** Cette première remarque nous apparaît comme quelque peu biaisée. En effet, si l'on confie une évaluation experte à des non experts, naturellement, l'évaluation ne peut pas être considérée comme correcte. Cette remarque s'applique d'ailleurs quelle que soit la méthode d'évaluation : une expertise ne vaut que par la qualité de l'expert impliqué. De manière plus nuancée, on notera d'ailleurs que cette phrase montre ici

l'absence d'un élément de définition de la *face validation*, qui nous paraît aussi rarement spécifié par les autres auteurs. En effet, dans les définitions citées précédemment, il n'est pas explicité qui doit mener la *face validation*. HERMANN, dans ses propos, considère que c'est au modélisateur uniquement de mener cette phase d'évaluation, alors que la lecture des autres références laisse penser 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, section 1.3.1). Cette position n'est ni la seule, ni celle que nous défendons ici.

- **Invraisemblance de certains comportements.** HERMANN met en avant le fait 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 de ce type, quelle qu'en soit la méthode. On ne doit et ne peut en effet 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. Si le modélisateur connaît les « substitutions » opérées dans le modèle, il se gardera donc bien de juger de leur vraisemblance. *A contrario*, un expert thématicien pourrait être étonné par certains comportements microscopiques, dans la mesure où il ne connaîtrait 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 conjointement le thématicien et le modélisateur. Plus généralement, cette limite est présente s'il n'y a pas d'explicitation des « substitutions » implémentées, c'est-à-dire de la correspondance entre le domaine conceptuel et le domaine du modèle implémenté : le niveau attendu de plausibilité individuelle de chaque comportement doit être décidé pendant la construction du modèle.
- **Explicitation 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 colla-

boratif, 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 gigantesque 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 avec précision en amont, la *face validation* présente de nombreux atouts au-delà 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[ed], 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 plausibly 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'autrice, 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 » (*Validation, Verification and Testing techniques*) aux différentes phases du cycle de vie d'un modèle, seules 5 techniques¹⁸ (sur 77 analysées), parmi lesquelles la *face validation*, présentent la caractéristique d'être mobilisables à chacune de ces phases. Pour obtenir cette information, nous avons croisé plusieurs travaux de BALCI.

18. 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 (*walkthrough*).

Dans un premier article (BALCI 1997), cet auteur présente toutes les méthodes de VV&T qu'il a identifiées, et il les classe en quatre catégories. Chaque méthode peut ainsi être formelle, informelle, statique ou dynamique. Nous avons tiré d'un second article (BALCI 1998) un tableau présentant l'applicabilité de chacune de ces méthodes à l'une des 18 étapes du « cycle de vie » des modèles de simulation qu'il identifie. Nous définissons à partir de là un « taux de couverture » des méthodes de VV&T, c'est-à-dire la part des 18 étapes dans laquelle chaque méthode peut être mobilisée. En numérisant ces deux informations, relatives aux catégories des méthodes et à leur applicabilité, nous avons pu créer une représentation graphique (figure 3.6) qui les croise.

3.1. COMMENT ÉVALUER UN MODÈLE ?



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).

Cette figure fait apparaître très nettement une « hiérarchie » d'applicabilité des méthodes selon leur type : les méthodes informelles sont les plus souvent mobilisables, suivies par les méthodes statiques et certaines méthodes dynamiques.

3.1.4 Vers une évaluation visuelle

Au regard de ces éléments, il nous semble que l'utilité des approches de *face validation* est assez largement démontrée pour en faire le cœur de notre démarche d'évaluation. Cette utilité est effective quelle que soit l'usage de ces méthodes : que cette approche soit cantonnée à une phase préalable mineure ou au contraire à une bonne pratique plus générale, à mener lors de chacune des phases de construction et d'évaluation d'un modèle.

3.1.4.1 Une démarche comparative

Comme identifié dans la partie sur les limites et intérêts de cette approche (sections 3.1.3.2 et 3.1.3.3), il nous semble que la *face validation* souffre, en matière de réputation, d'un manque de clarification de la démarche qu'elle met en œuvre. Dotée d'un protocole d'évaluation rigoureux, nous considérons que cette méthode peut au contraire 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 – ou entre des observations empiriques et des comportements simulés plus généralement – et cherchent à quantifier et à minimiser cet écart. La *face validation* procède à un même démarche comparative :

« Face validation is a validation method that compares simulant behavior to model results. [...] Based on their knowledge of the simulant, the observers subjectively compare the behavior of the simulant as reflected in the simulation results with their knowledge of the behavior of the actual simulant 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. PETTY (2010, p. 341)

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 qualitative. Dans les modèles descriptifs dotés de nombreux indicateurs non résumables, tel que SIMFEODAL, 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 compensées 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 de « validité » vis-à-vis de l'évaluation statistique se restreint fortement. Pour évaluer les modèles du type de SIMFEODAL, nous considérons dès lors qu'il est tout à fait possible de mener une évaluation experte, s'inscrivant sur des logiques de *face validation*, et en particulier de sa composante d'évaluation des sorties (voir 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. Les différentes approches visuelles ont fait leurs preuves dans de nombreux autres champs disciplinaires et constituent un pan non négligeable des méthodes d'analyse. Nous pensons donc adéquat d'en faire un usage argumenté dans le domaine de l'évaluation de modèles de simulations. Notons un usage proche de la *face validation*, appliquée aux modèles aussi, mais statistiques cette fois-ci, visant à l'évaluation visuelle de modèles de « *Data Science* ». EILERS et al. (2017), à propos de modèles de *machine learning*, 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 experts¹⁹.

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. L'évaluation visuelle consiste à évaluer, visuellement, la plausibilité du comportement d'un modèle à partir des données qu'il produit. Cette plausibilité

19. « 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)

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 simulation²⁰ – et en les agrégeant 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 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 que l'on complète par le recours à la visualisation. Il devient alors possible d'apprécier l'écart entre le modèle et le système qu'il représente, sans chercher pour autant à quantifier ni à mesurer cet écart. Il s'agit plutôt d'ordonner différentes versions ou paramétrages d'un modèle de simulation afin de juger de ceux qui semblent minimiser le mieux cet écart.

Un dernier point nous semble particulièrement appréciable dans ce recours à l'appréciation visuelle plutôt qu'à une mesure stricte de l'écart entre une situation estimée parfaite et une situation simulée. C'est la capacité, humaine, à estimer semblable des configurations spatiales qui seraient jugées très différentes par une méthode de calcul quelconque. Si l'on cherche par exemple à estimer l'écart entre un semis de point cible et un semis simulé, on peut mesurer l'écart comme, par exemple, une somme des écarts de chacun des points à celui qu'ils sont sensés représenter²². Un décalage minime, par exemple obtenu par translation horizontales de quelques dizaines de mètres sur un semis régional, engendrera alors une démultiplication des erreurs, alors même qu'un œil humain aurait jugé ces deux semis quasi-identiques. En terme de configuration spatiale, la quantification peut ainsi amener à des contre-interprétations dans l'analyse. Dans le cadre d'un modèle comme SIMFEODAL où l'espace est important et, qui plus est, théorique et aléatoire, donc difficilement agrégeable (cf. chapitre 6, section 6.1.1), le recours systématique à l'évaluation visuelle nous paraît alors indispensable.

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 « à l'œil » à laquelle peuvent donner lieu certaines méthodes reposant sur la plausibilité et l'estimation sans protocole rigoureux.

20. L'utilisation de la *face validation* pendant la durée de l'exécution des modèles, c'est-à-dire via l'inspection dynamique des comportements du modèle, n'est pas véritablement traitée dans cette thèse. Ce choix, explicité dans la section 4.2.1, n'invalide pas pour autant que l'évaluation visuelle proposée soit aussi menée, par exemple avec des modèles plus KIDS, « en direct », en fixant là aussi des critères spécifiques.

21. Cet aspect est discuté dans les chapitres 1, 2 et 6. 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 la base d'une seule exécution. Au contraire, seule l'exécution d'un certain nombre de réPLICATIONS permet de s'assurer que le comportement évalué correspond bien au comportement habituel, ou tendanciel, du modèle.

22. Il existe naturellement des méthodes d'analyse spatiale ou de géo-statistiques bien plus adaptées ou performantes. Cet exemple n'a qu'un but de simplification.

3.1.4.5 Des critères pour l'évaluation visuelle : construire des indicateurs de sortie de simulation

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 choisi de mobiliser 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, il reste donc à définir plus précisément ces composantes de l'évaluation, ainsi qu'à expliciter les objectifs fixés pour chacun des indicateurs que l'on va construire.

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, 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. Tous les mécanismes figurant dans le modèle conceptuel ont été implémentés mais tous les liens, interactions et valeurs de paramètres ne sont pas encore stabilisés. De ce fait les résultats des simulations ne répondent pas toujours complètement 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 paysans que l'émergence de pôles. Certains sont centraux, d'autres secondaires, mais les concepteurs du modèle ont des attentes spécifiques vis-à-vis de chacune des dynamiques produites par le modèle. 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.

Une telle description repose sur la construction d'« indices empiriques » et d'« indicateurs de sortie de simulation » qui vont permettre de rendre compte des résultats des simulations. Il s'agira d'exprimer les attentes sous formes de critères relatifs à ces indicateurs de sortie de simulation.

Dans cette partie, nous expliciterons d'abord le sens que l'on prête à ces « indices empiriques » et « d'indicateurs de sortie de simulation ». Ceux-ci prennent des formes diverses – certains sont multivariés par exemple – 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 5 (section 5.1.2).

3.2.1 Indices et indicateurs

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. 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. 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**, données issues de variables informatiques produites par le modèle de simulation et devant pouvoir être comparés à chacun des indices empi-

riques. La figure 3.7 reprend, sous forme de schéma ontologique synthétique, ces deux ensembles de mesures, explicitant le vocabulaire mobilisé dans cette partie.

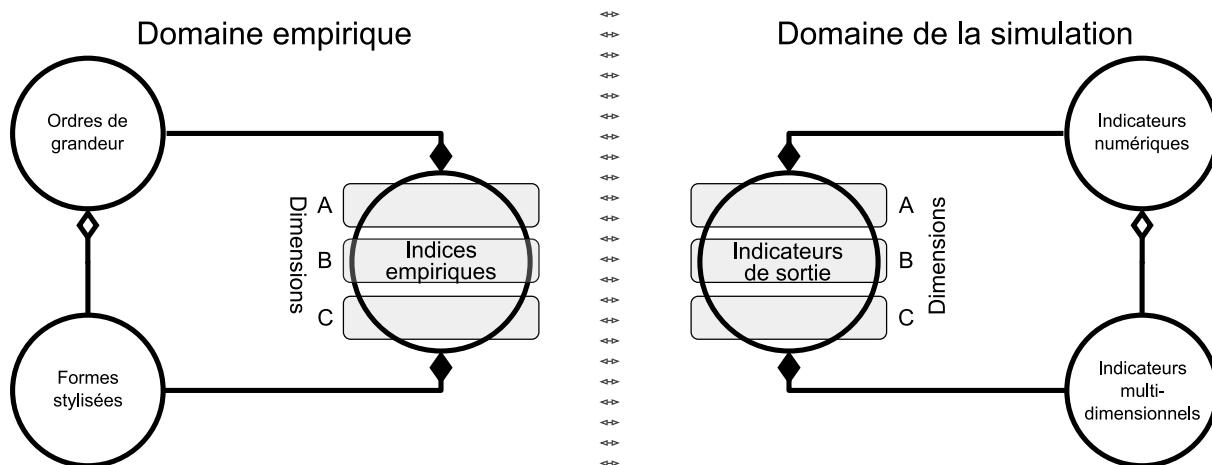


FIGURE 3.7 – Schéma de synthèse des correspondances entre mesures relevant du domaine empirique et mesures issues des simulations pour l'évaluation du modèle SIMFEODAL.

Dans cette figure, on représente au moyen d'une symétrie axiale la correspondance entre le **domaine empirique** et le **domaine de la simulation**. Les **indicateurs de sortie** sont donc la correspondance simulée des **indices** du domaine empirique. Indices et indicateurs de sortie sont catégorisés selon des **dimensions** (A, B, C) qui correspondent aux processus que l'on cherche à modéliser : la polarisation du système de peuplement, sa hiérarchisation, sa fixation, etc. Ils sont donc transverses aux entités modélisées, qui peuvent donner lieu à plusieurs dimensions selon le processus qu'elles produisent. Les dimensions sont donc composées²³ d'un ensemble d'indices, pour la partie empirique, et des indicateurs de sortie de simulation correspondants.

Les indices empiriques peuvent être de deux formes. Nous nommons la forme la plus simple « **ordre de grandeur** ». Ces indices expriment donc une valeur observée, connue avec plus ou moins de certitude (d'où le terme d'ordre de grandeur), qui trouvera une correspondance dans le domaine simulé sous la forme d'un **indicateur numérique**. D'autres indices ont une forme plus complexe, reposant sur l'agrégation²⁴ de plusieurs ordres de grandeur, et on les nomme « **formes stylisées** », par analogie aux faits stylisés déjà décrits. Dans le domaine de la simulation, les indicateurs de sortie correspondant sont appelés « **indicateurs multidimensionnels** », pour appuyer l'idée qu'ils sont constitués de plusieurs indicateurs numériques.

On peut illustrer cela avec un exemple tiré de SIMFEODAL. Dans le domaine empirique, on sait que la part de l'habitat rural dispersé tend à diminuer au cours de la période, depuis environ 95% jusqu'à environ 20%. C'est notamment l'un des indices du processus de polarisation, qui constitue une dimension d'analyse. Ces deux valeurs sont des indices empiriques, de type « **ordre de grandeur** ». Dans le modèle de simulation, on a un indicateur de sortie correspondant qui correspond au taux de foyers paysans isolés.

23. Les losanges noirs marquent une relation de composition dans le formalisme UML, repris dans ce schéma. La position du losange indique le sens de la relation : les indices sont composés d'ordres de grandeur et de formes stylisées.

24. En UML, un losange vide symbolise les relations d'agrégation : plusieurs ordres de grandeurs sont nécessaires pour définir une forme stylisée.

Le taux de foyers paysans isolés en début de simulation est un indicateur numérique, de même que celui en fin de simulation. La forme de la courbe d'évolution du taux de foyers paysans isolés au cours de la simulation est un indicateur multi-dimensionnel : elle repose sur une succession d'indicateurs numériques que sont les relevés du taux à chaque pas de temps. Cette forme de courbe peut être évaluée au regard de la forme stylisée, dans le domaine empirique, sur laquelle elle s'appuie. On sait que la part de l'habitat rural diminue régulièrement au cours du temps, et on évaluera donc, pour cette dimension (la polarisation), la capacité du modèle à reproduire un processus de polarisation semblable à celui observé par le biais de la forme stylisé « diminution régulière de la part de l'habitat rural dispersé ».

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 estimés, au sens le plus large, c'est-à-dire être en capacité d'être reproduits et comparables avec d'autres mesures. Dans cette étude, nous avons 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 des connaissances sur lesquels ils reposent (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 –.

Ordres de grandeur. La première catégorie est constituée d'**ordres de grandeurs** empiriques estimés – avec une précision plus ou moins importante (cf. Annexe A, section A.1). Certaines valeurs empiriques sont 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.

Faits et formes stylisés. La seconde catégorie d'indices empiriques est moins formalisable 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** »²⁵, qui rendent davantage compte d'une tendance dans la forme d'une relation ou d'une organisation que d'un ordre de grandeur. On fait un large usage de ces faits stylisés en économie,

25. 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. »

mais aussi en géographie, par exemple quand on qualifie la tendance des systèmes de peuplement à se hiérarchiser²⁶. 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, SWERTS et al. 2015, §9)²⁷. 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 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 d'une part des « allures » de courbes, temporelles (par exemple l'évolution dans le temps d'un indicateur tel que le taux de concentration des foyers paysans) ou liées à une composition de valeurs (par exemple la courbe rang-taille correspondant à la hiérarchie des agrégats), et d'autre part des formes de répartition spatiale (densité du semis d'églises paroissiales par exemple). 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 ci-dessus 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

26. Voir par exemple la liste des « faits stylisés de la dynamique des systèmes de villes » dressée dans SCHMITT (2014, p. 79-80).

27. Notons que les auteurs de PUMAIN, SWERTS et al. (2015) nuancent cette affirmation, en montrant empiriquement que les pentes convergent vers des valeurs supérieures ou inférieures à 1 en fonction de l'ancienneté de l'intégration des systèmes de villes considérés (CURA, COTTINEAU et al. 2017).

sorties du modèle de simulation avec les formes stylisées identifiées dans le domaine empirique. Chaque indice empirique doit ainsi se voir correspondre 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 les 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 empirique²⁸ : 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

28. VARENNE (2013, p. 18, d'après REY-COYREHOURCQ 2015, p. 142) utilise le terme d'« engagement ontologique » pour désigner le rapport à l'empirique de chacune des hypothèses de modélisation.

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 agrégeant 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 à lui 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 » (voir section 1.2.3). 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. Dans CHÉREL, COTTINEAU et REUILLOU (2015), par exemple, les auteurs explorent un modèle de « *flocking* » par l'intermédiaire de telles méthodes, en explorant les conséquences de changement des paramètres sur trois fonctions objectifs (taille des groupes, force de la diffusion du comportement et vitesse moyenne).

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 directement de connaissances expertes, qu'il est difficile de les préciser outre-mesure, et que les thématiciens qui les ont consolidées sont peu enclins 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, perdrait beaucoup dans la finesse de description du système modélisé. En effet, une limite forte de tels indicateurs est qu'ils peuvent résulter en des équivalences de valeurs pour des raisons très différentes.

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 « simples », c'est-à-dire ni composites ni exprimés sous forme de fonction objectif. Ce choix a toutefois des implications majeures pour la méthodologie mise en place pour l'analyse des sorties de simulation. Il est en effet bien plus simple d'analyser quelques indicateurs composites 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, la même capacité à rendre compte des 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 incrémentale (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 les données empiriques 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 (voir Annexe A, section A.1) 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.

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, « coller aux données » à tout prix n'est pas la priorité. La vraisemblance d'ensemble du modèle compte en effet bien plus que la précision de chacune de ses composantes. Pour l'évaluation de SIMFEODAL, nous ne tiendrons compte de l'incertitude des indicateurs qu'au cas par cas, sans la mesurer de manière systématique et donc sans établir de hiérarchie à partir de cette incertitude.

3.2.2.2 Catégoriser les indicateurs : définir des dimensions d'analyse

En présence de plus d'une quarantaine d'indicateurs, il est 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 (entités représentées, type d'indicateur, précision de la connaissance, etc.) des indicateurs du modèle. Au contraire, et cela nous semble plus adapté pour un modèle à forte visée exploratoire et heuristique, la hiérarchisation des sorties du modèle doit suivre la hiérarchie implicite qui structure les hypothèses et objectifs du modèle en lui-même, c'est-à-dire une hiérarchie thématique. 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 de chercher à hiérarchiser ces indicateurs de manière globale. La hiérarchisation des indicateurs se fera donc relativement à chacune de ces catégories.

La dynamique du système de peuplement que l'on cherche à reproduire sur la période IX^e-XII^e siècle comprend trois processus (cf. section 2.1.2), que nous nommerons dimensions (voir figure 3.7) : (1) polarisation de l'habitat rural, (2) hiérarchisation du système de peuplement et (3) fixation des foyers paysans. On peut s'appuyer sur ces trois dimensions pour caractériser les sorties du modèle, c'est-à-dire mener la confrontation entre indices empiriques et indicateurs de sortie.

On va 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 observée depuis le point de vue de ce qui polarise (les attracteurs) tout autant que de ce qui est polarisé (les foyers paysans).

Pour trancher, on examinera d'abord un indicateur de sortie numérique, caractéristique de la structure dans son ensemble à son état final. Les indicateurs de sortie représentatifs des dynamiques ayant mené à cette structure finale, par exemple les indicateurs multi-dimensionnels temporels, seront étudiés dans un second temps. Dans cet exemple, on analysera donc dans un premier temps le résultat effectif de la polarisation, c'est-à-dire la concentration des foyers paysans en agrégats, avant d'observer dans un second temps 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 structurels auxquels 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. L'ordre d'observation des indicateurs est plutôt stable, mais l'importance que l'on portera à chacun 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, chacun aura une importance variable. L'étude de la dispersion des agrégats et pôles peut en effet 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 – de manière incrémentale et itérative, voir THOMAS (2012) – 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.

3.2.3 Les indicateurs et dimensions de SimFeodal

Dans cette sous-partie, nous présentons de manière synthétique mais exhaustive l'ensemble des indicateurs mobilisés pour l'évaluation de SIMFEODAL, et qui serviront à la présentation des résultats du modèle dans le chapitre 5 (section 5.1.2). Cette énumération suit l'ordre hiérarchique définit plus haut, et est organisée en reprenant les trois dimensions de la dynamique du système de peuplement étudié : polarisation, hiérarchisation et fixation.

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 d'après les connaissances d'experts 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.

Pour appréhender 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, sous la forme d'indicateurs de sortie de simulation. Il est nécessaire de faire appel à des indices (et donc à des indicateurs de sortie) hétérogènes, chacun devant être en mesure de décrire les différents aspects du phénomène de polarisation. En conséquence, nous avons 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 emballlement 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 cette mesure, nous faisons 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 qu'elle est 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 détailler la manière dont le modèle génère de la polarisation.

Taux de foyers paysans dispersés. Cet indicateur, et sa déclinaison temporelle, sont vraisemblablement les plus évidents à observer pour décrire la dimension « polarisation » : plus le taux de foyers paysans dispersés en fin de simulation est faible, plus le système de peuplement est polarisé. On peut de plus affiner légèrement la précision de l'information communiquée par cet indicateur en observant son évolution temporelle. Il faut certes atteindre un objectif quantifié (environ 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 (environ 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 verrait une croissante lente de cet indicateur, le temps que les mécanismes agissent sur la polarisation. Une période de croissance plus rapide suivrait, une fois que tous les foyers paysans commenceront à être suffisamment attirés par les pôles pour y former des agrégats. Dans un dernier temps, une nouvelle phase de croissante plus lente est attendue, une fois que les foyers paysans auront été répartis dans les agrégats existants et qu'ils se déplaceront vers des agrégats plus importants, hiérarchisant ainsi 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 et présence d'agrégats dans les 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 qu'il y en ait au moins autant que d'agrégats, puisqu'on voudrait que chaque agrégat fasse partie d'un pôle. Contrairement aux agrégats, un nombre trop important de pôles ne constitue pas un problème : en considérant qu'environ 20% des foyers paysans restent 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, il faut que le taux de pôles contenant un agrégat soit important, et surtout croissant au cours du temps. Comme dans les observations empiriques, cela serait alors le marqueur que de petits pôles d'attractions (composés d'une église paroissiale par exemple) 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 réguliè-

rement 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 visualiser des exemples de configurations spatiales issues des simulations.

3.2.3.2 Évaluer la hiérarchisation du système de peuplement

La deuxième dimension de la dynamique du modèle SIMFEODAL que l'on évalue correspond à 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 attend donc du modèle que les agrégats modélisés suivent une distribution approchant de la distribution log-normale.

Au regard de nombreux exemples empiriques, cette forme de distribution est omniprésente dans les processus sociaux, et l'on attend alors du modèle qu'il produise des formes log-normales pour d'autres distributions. 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.

L'indicateur principal de cette hiérarchisation du système de peuplement est la forme de la **distribution des agrégats** en fonction du nombre de foyers paysans.

Les indicateurs secondaires peuvent ici aussi être mobilisés pour préciser cet indicateur principal, et en particulier analyser les moteurs de cette hiérarchisation du peuplement. On a en effet choisi d'observer la **hiérarchisation des autres types d'entités** – pôles, seigneurs, paroisses –, pour vérifier si 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 reproduire 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 multidimensionnel qui représente la hiérarchie des agrégats, exprimée en fonction du 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, on s'attend à ce que la pente de la courbe augmente avec le temps, tout en devenant plus convexe. Cela représenterait 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, il est là encore nécessaire d'observer le comportement des agents qui provoquent cette hiérarchisation, c'est-à-dire les pôles. En effet, une forte hiérarchie des pôles entraînera une attractivité très différenciée des foyers paysans. 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 secondaires 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 s'attend à obtenir, pour ces deux indicateurs, une courbe rang-taille d'allure similaire en fin de simulation. Celle-ci devrait présenter une relation log-normale classique, avec bien plus 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 pré-figurent le maillage communal. Sur la période étudiée, elles ont un double rôle de desserte efficace²⁹ et équitable³⁰. Selon les connaissances empiriques, 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 raisonnable³¹. Il y a donc un certain nombre d'églises paroissiales qui desservent peu de paroissiens, et on s'attend à les retrouver dans les sorties du modèle.

Dans les zones les plus denses, et en particulier au sein des petites villes naissantes, le nombre d'églises paroissiales accompagne la croissance de population afin de garantir 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.

En sortie de simulation, 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 »

Hiérarchie des seigneurs. Cet indicateur, mentionné plus haut, illustre parfaitement le propos de l'encadré 3.2. C'est en effet un indicateur qui a été fortement mobilisé dans les premières versions du modèle, puis abandonné petit à petit au fur et à mesure de la simplification des mécanismes liés aux lignages seigneuriaux. Dans les versions les plus récentes du modèle, cet indicateur n'est ni observé, ni même généré depuis les données en sortie, et on ne le décrira donc pas ici en dehors de cette mention.

3.2.3.3 Évaluer la fixation et la dissémination du peuplement

La fixation des foyers paysans et la dissémination globale du système de peuplement constituent la troisième dimension de la dynamique étudiée dans SIMFEODAL. La notion de fixation, au sein du maillage naissant que constituent les paroisses, pose problème par rapport à l'ensemble des indicateurs de sortie déployés jusqu'ici en ce qu'elle nous paraît plus difficile à observer et à mesurer dans les sorties du modèle de simulation.

Quand on parle de fixation de l'habitat paysan, empiriquement, on observe les foyers paysans, et non les agrégats dont on peut facilement dire s'ils sont stables ou non.

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

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

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

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 la stabilité de leurs composantes. En effet, 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 dernière version) et une bonne partie d'entre eux migrent. Ces migrations suivent, de plus, des modalités très différentes (cf. section 2.7.3.2), 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 agrégés spatiaux, même multidimensionnels (une ou plusieurs cartes par exemple), 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, nous avons retenu des indicateurs relatifs aux **migrations des foyers paysans** et à l'explication de ces migrations : combien de foyers paysans se déplacent-ils 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, d'après les connaissances empiriques, 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. Nous nous appuierons 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 analysées, nous n'établissons ici pas de hiérarchie stricte entre des indicateurs principaux et des indicateurs secondaires. 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 une forme de 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 chacun des foyers paysans que la configuration spatiale évolue. Les migrations affectent donc chacun des processus modélisés – polarisation, hiérarchisation et fixation –, mais c'est dans la dimension correspondant à ce dernier processus 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 attendu 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 : 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 de la simulation, 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 (figure 2.5). Cela engendre nécessairement une plus forte propension des foyers à migrer.

Les connaissances empiriques sont très imprécises au regard de la finesse des indicateurs, mais on peut tout de même estimer que l'évolution des migrations suit plusieurs rythmes au cours du temps :

1. Avant 950, on attend quelques migrations lointaines, dans une proportion stable ; 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 occasionner une nette augmentation des migrations locales, et dans une moindre mesure lointaines, prémisses à la constitution d'agrégats plus hiérarchisés.
3. Après ces perturbations, le niveau de migration devrait diminuer, le système se stabilisant à l'approche de la fin de la période.

Satisfaction des foyers paysans. Les migrations des foyers paysans sont très liées au niveau de satisfaction de ces agents. Pour comprendre ces migrations, il est donc utile d'observer en détail l'évolution de la satisfaction qui les provoque.

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. Cependant, mobilisé ici, cet indicateur permet ainsi de préciser les indicateurs précédents en donnant une explication à leurs tendances.

Une satisfaction globalement trop élevée résulte en peu de migrations, et donc en une faible polarisation. Au contraire, une satisfaction globalement faible engendrerait une très forte mobilité, et donc 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. section 2.3.4) et viennent renforcer l'encadrement des foyers paysans. L'évolution du maillage constitué par les ressorts paroissiaux matérialise donc l'évolution de la structure spatiale des foyers paysans. Pour que les foyers paysans soient satisfaits, il est en effet nécessaire (à partir de 950) qu'ils soient suffisamment proches d'une église paroissiale. Observer la croissance du nombre et la répartition des paroisses telles que simulées dans le modèle SIMFEODAL, constitue donc un bon moyen d'observer la dissémination du peuplement.

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, 145). 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 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, il est intéressant d'en observer la couverture spatiale. Pour cela, il est possible de quantifier la dispersion de ces paroisses en analysant leur répartition spatiale, ou plutôt, celle des églises paroissiales qui en constituent le cœur.

Nous faisons 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 simple-

ment 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'augmentation du nombre d'églises paroissiales).

3.2.3.4 Évaluer SimFeodal pour en permettre le paramétrage

Dans les pages précédentes, nous avons présenté les indices et indicateurs à partir desquels l'évaluation de SIMFEODAL est menée. La description des attendus vis-à-vis de chacun de ces indicateurs, c'est-à-dire du comportement observé ou estimé des indices, définit les critères de l'évaluation du modèle. Ces critères sont indispensables au cycle de vie d'un modèle de simulation, même exploratoire et heuristique tel que SIMFEODAL. 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'améliorent – approchant les sorties du modèle de l'objectif – ou le détériorent – 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 satisfaisante d'un modèle amené à évoluer. Cette version 6.3 implique que de nombreuses versions précédentes ont été développées, 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 chapitre 5 (section 5.1.2), 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 population³², l'accroissement de la 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 et convient à la quasi-totalité des systèmes d'équations³³. 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

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

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

as a mean or a standard deviation. For example, the mean (average) score on the midterm exam in Psychology 201 is a parameter. It describes the population composed of all those who took the exam. »

(VOGTT 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 (*ibid.*, *ibid.*). On peut toutefois y retrouver une logique commune avec les paramètres mathématiques quand on décrit une loi statistique avec ces valeurs, qui deviennent alors les éléments permettant de caractériser la distribution d'une variable. Pour décrire les caractéristiques de la distribution théorique, par exemple normale, d'une variable X , on fera appel aux paramètres théoriques de cette loi que sont l'espérance³⁴ (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 de « paramètre » est bien plus floue et inclusive que dans les champs décrits auparavant, sans doute en raison d'une hétérogénéité bien supérieure des 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 fonction³⁵ pour toute suite d'instructions informatiques ayant vocation – ou pour capacité – à être répétée, ré-exécutée. Ces fonctions appliquent ainsi, le plus fréquemment, une suite d'instruction sur des données en entrée, et produisent ainsi des données en sortie, résultantes du traitement effectué sur les entrées³⁶. 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.

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

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

35. 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 utilisées à mauvais escient, provoquant alors des inversions de sens. Ainsi, une procédure est le plus souvent décrite 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).

36. 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.

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 requiert au moins deux « paramètres » : l'emplacement informatique du fichier image 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 « paramétrier » 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 spécifiquement 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 sur 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. »

(ibid., 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 contre-courant 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 des usages courants 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 représentatifs dans le champ de la modélisation en sciences humaines internationale et se retrouvent partiellement dans le schéma de BALCI (figure 3.8).

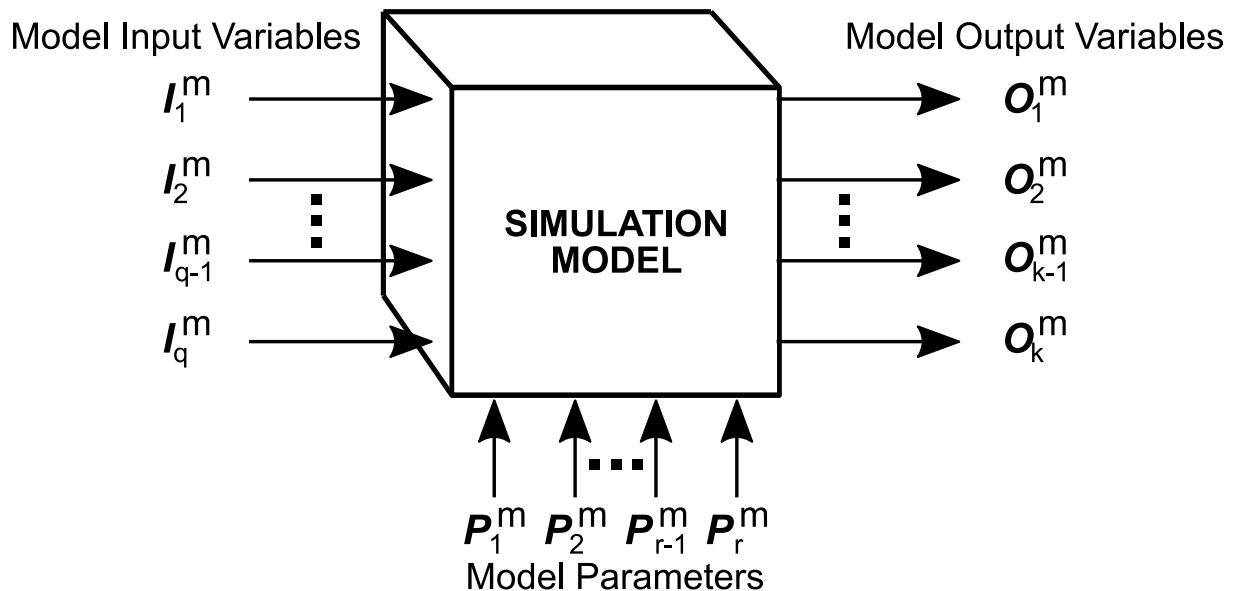


FIGURE 3.8 – Les variables d'un modèle de simulation, adapté depuis BALCI (1994, p. 122).
N.B : ce schéma est tronqué, ne présentant que la partie « modèle de simulation » alors que celle-ci est mise en miroir à une partie « système » représentant les éléments du domaine empirique.

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 altérées par des paramètres (*Model Parameters*). Après passage dans la « boîte noire » que représente ici le modèle de simulation (m), on obtient 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 le fait 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 se 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 que les éléments affectés soient précisés.

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 adaptée à la description d'un modèle tel que SIM-FEODAL.

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

Les entrées du modèle. La figure 3.9 représente notre proposition de définition des entrées. Les entrées y sont 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.

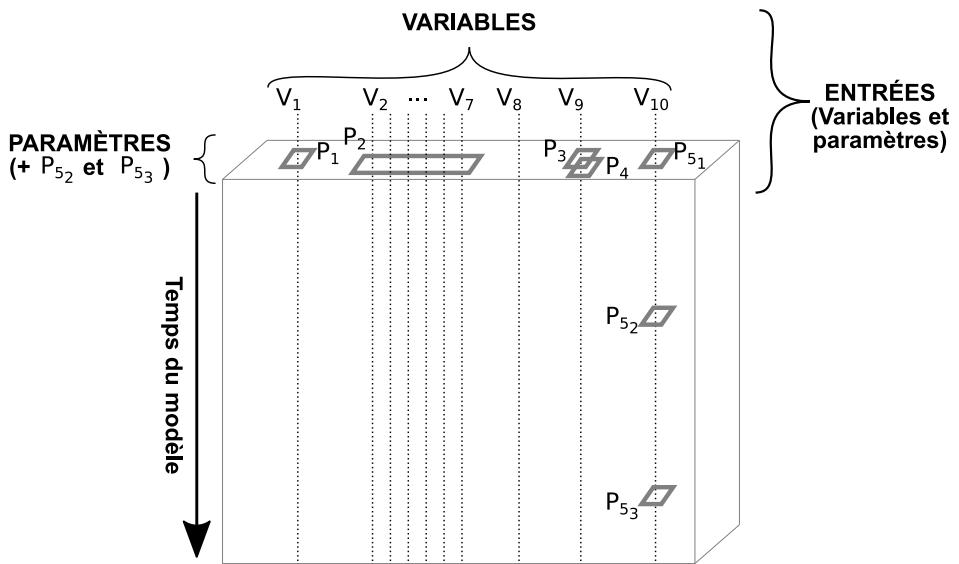


FIGURE 3.9 – Les entrées : variables et paramètres.

Ces variables sont potentiellement affectées par des **paramètres** (P_n), qui peuvent avoir des effets directs sur une variable unique (P_1 par exemple, qui pourrait représenter le paramètre régulant le nombre d'agrégats à l'initialisation), ou sur plusieurs variables (P_2 , nombre de foyers paysans par agglomération secondaire antique dans la configuration initiale 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 de celle-ci. 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, correspondant aux pas de temps auxquels appliquer les différentes modalités prises par le paramètre (voir section 2.6). Dans la figure 3.9, P_{51} , P_{52} et P_{53} correspondent par exemple à l'évolution du seuil de distance acceptable aux châteaux.

Les sorties du modèle. À l'autre extrémité du modèle, dans la figure 3.10, on retrouve les variables (V_n), dont certaines sont utilisées pour construire des **indicateurs de sortie** (I_N).

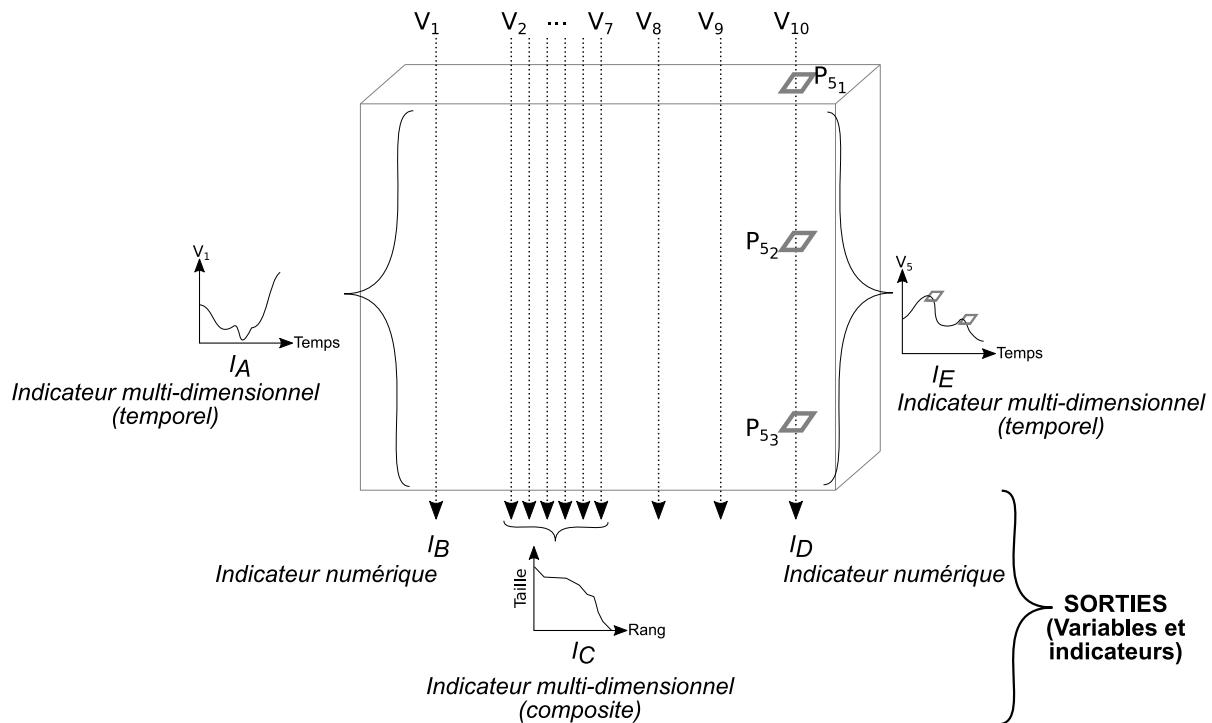


FIGURE 3.10 – Les sorties : variables et indicateurs.

Parmi ces indicateurs de sortie, on identifie là aussi plusieurs types. Certains indicateurs (ici, c'est le cas de 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 I_C , qui peut par exemple représenter la courbe rang-taille issue, dans l'exemple de la figure 3.10, des variables V_2 à V_7 qui seraient alors les populations des agrégats), soit à l'évolution temporelle d'une variable (ici, c'est le cas de I_A et I_E). Ce sont dans ce cas des indicateurs de sortie multi-dimensionnels temporels. 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 par conséquent 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 utilisée dans l'indicateur I_D , ne peut être étudiée dans son évolution (I_E) sans prendre en compte l'influence forte du paramètre évolutif

3.3. PARAMÉTRAGE DU MODÈLE SIMFEODAL

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_{5_2} et P_{5_3} 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.

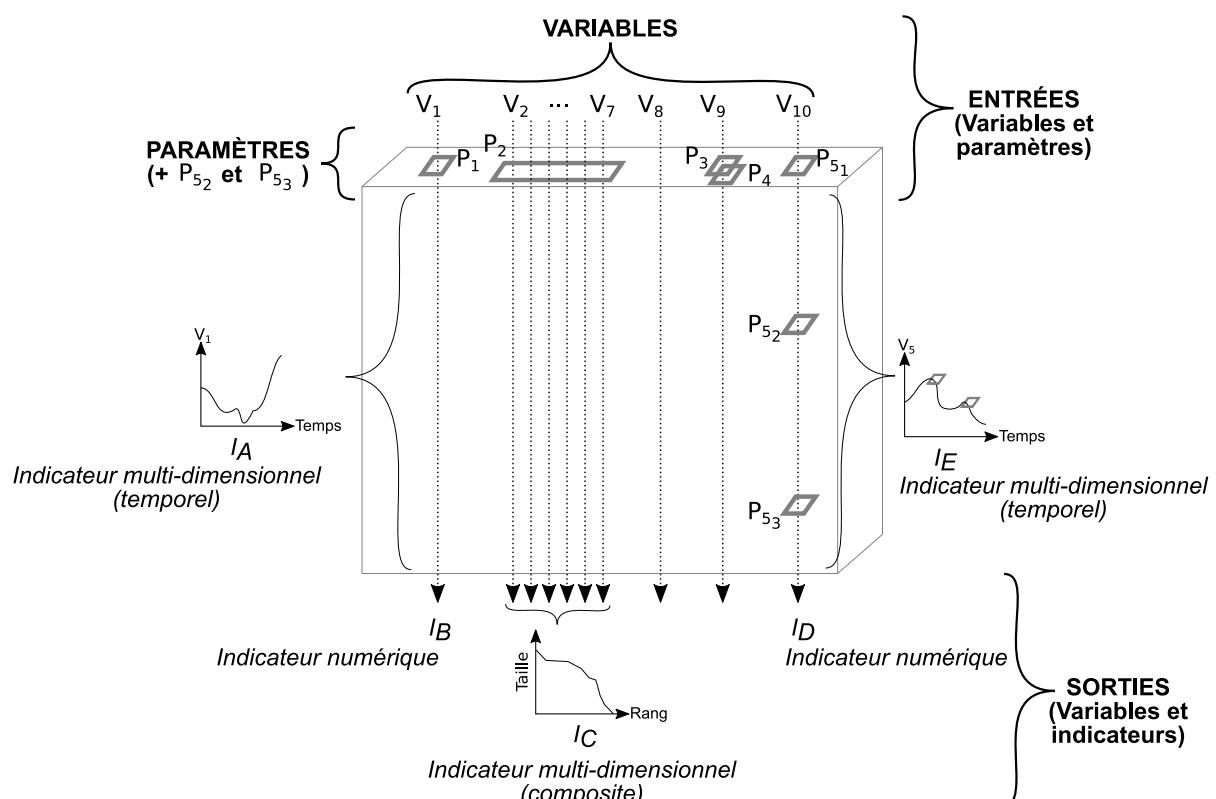


FIGURE 3.11 – Organisation des entrées et sorties du modèle.

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 (c'est le cas de P_{5_1} , P_{5_2} ou P_{5_3} dans la figure 3.11) 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 d'une même simulation, ni même des réplications d'une simulation, mais au sein d'expériences (figure 3.12), dont le but est justement de faire varier ces paramètres pour en comparer les effets. Comme les paramètres varient (P_2 , P'_2 ou P''_2 par exemple), il est attendu que les variables de chacune de ces expériences soient affectées différemment. En faisant varier les paramètres selon les expériences, les indicateurs de sortie tirés de

ces variables varieront aussi. C'est à partir de ces indicateurs de sortie et leurs écarts d'une expérience à l'autre que l'on pourra qualifier les effets des paramètres sur le modèle.

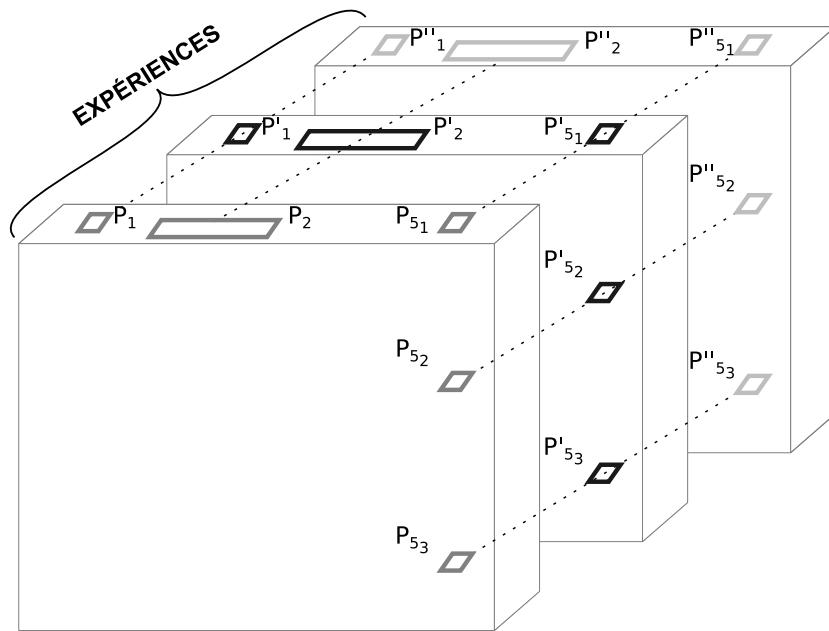


FIGURE 3.12 – Variation des paramètres entre les expériences.

3.3.1.3 Les paramètres dans le modèle 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 hétérogène, que ce soit par leur valeur ou par la manière dont ils varient. Il convient donc d'identifier différents types de paramètres, non selon leurs caractéristiques propres (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 techniques³⁷, 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 Annexe A, section A.2) 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 lequel chaque paramètre repose (paramètres techniques vs autres), et d'autre part l'usage qui en est fait dans le modèle (*input* et contexte vs autres). Cette typologie est notamment appuyée sur celle de TANNIER (2017, p. 45).

37. 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 de mécanisme, 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 différentes versions d’un modèle 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 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 basée 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. 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 un ensemble de données observées dans le domaine empirique en faisant varier les valeurs des paramètres jusqu'à ce qu'une combinaison de celles-ci soit satisfaisante.

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 produire les indicateurs de sortie les plus proches des données empiriques, 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, et l'on parle alors de méthode « essais-erreurs » (*trial-and-error*), par exemple chez des auteurs tels que BATTY et al. (1973)³⁸. Le calibrage peut aussi être effectué de manière semi-automatique, 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. Enfin, il est possible de mener le calibrage de manière entièrement automatique, souvent à l'aide de méthodes mathématiques d'optimisation. HEPPENSTALL, EVANS et BIRKIN (2007) et NGO et SEE (2012, p. 188), par exemple, effectuent le calibrage de leurs modèles à l'aide de d'une famille de méthodes informatiques nommées « algorithmes génétiques ».

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

38. Les auteurs définissent ainsi cette méthode : « The trial and error method of calibration involves running the model under different parameter values which are fixed systematically within some predetermined range. The performance of the model is assessed during each run and the range is gradually narrowed as the search homes in on what appears to be the best level of performance » (BATTY et al. 1973, p. 356). Notons que récemment, certains auteurs ont utilisé la dénomination de « calibration qualitative » pour définir cette approche (CROOKS et al. 2019, p. 253).

de paramétrage, processus le plus souvent inscrit comme l'une des composantes de l'évaluation des modèles (chez NGO et SEE (*ibid.*), cf. figure 3.3 par exemple).

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 une configuration optimale de paramètres. Dans ce deuxième cas, le paramétrage désigne un ensemble de valeurs de paramètres, par exemple dans l'expression « paramétrage par défaut », ou un paramétrage optimal. Pour ne pas risquer de contre-sens, nous réservons le terme de paramétrage au processus, et nous utiliserons l'expression de « jeu de valeurs de paramètres » pour désigner la seconde acceptation.

Le terme de paramétrage est très employé dans la littérature, le plus souvent comme un synonyme « faible » de calibrage, c'est-à-dire sans l'aspect quantifié et « final » que ce dernier terme contient. Nous choisissons ici de nous distinguer de ces approches, en différenciant calibrage et paramétrage. Dans un premier temps, cependant, il nous paraît important de re-situer le paramétrage (et le calibrage), en les incluant dans la construction du modèle plutôt que dans son évaluation, au contraire donc de l'approche de KLÜGL (2008) et NGO et SEE (2012) visible dans les figures 3.1 et 3.2.

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 les mieux adaptées, 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 (*ibid.*, p. 224)

Dans ce travail de thèse, nous reprenons ainsi le sens du terme paramétrage tel qu'initialement employé par HIRTZEL (2015)³⁹ et ensuite explicité 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 (ibid., p. 52)

Nous ne retiendrons pas dans ce travail la notion de phase d'estimation, mais trouvons nécessaire d'ajouter à cette définition une composante d'implémentation 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 d'étapes mineures 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. section 2.7.2.1) : 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.

Les étapes du processus de modélisation. De nombreux termes sont utilisés dans la littérature, souvent sans réelle distinction, pour désigner cette opération qui consister à choisir un jeu de paramètres pour un modèle. Pêle-mêle, on y retrouve le paramétrage, le calibrage, l'ajustement, l'estimation, etc. Nous proposons une représentation graphique, dans la figure 3.13, de notre usage du sous-ensemble de ces termes mobilisé dans cette thèse, et en donnons des définitions dans l'encadré 3.4.

39. « 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).

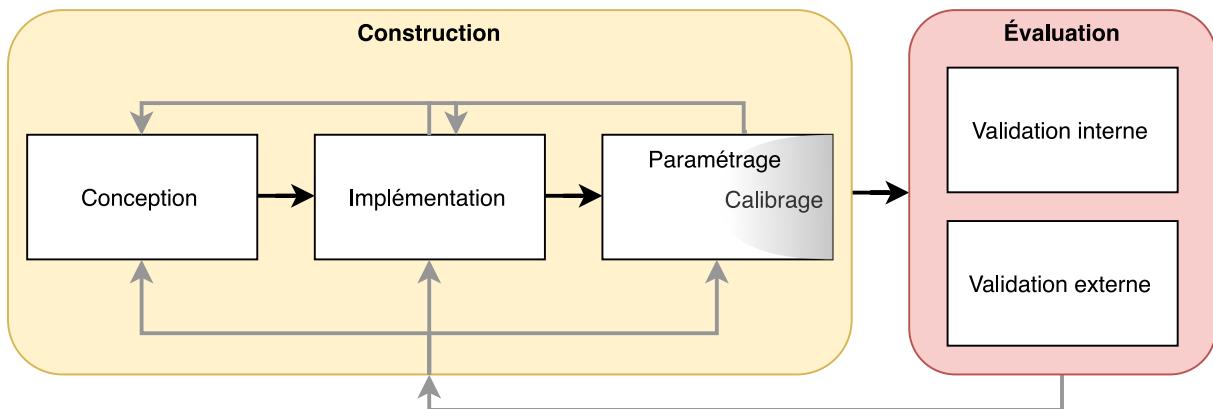


FIGURE 3.13 – Étapes du processus de modélisation.

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 à un modèle « finalisé », qui peut être évalué de manière globale (chacune des composantes de la construction pouvant être évaluée individuellement : l'implémentation est par exemple évaluée au moyen des méthodes de validation interne).
N.B. : Le terme de co-construction est d'un niveau de générnicité supérieur à celui de la construction ici définie. La co-construction, définie dans le chapitre 1 (section 1.4.1), désigne l'approche mise en place lors de chacune des étapes du modèle, et s'applique donc aussi bien à la construction qu'à l'évaluation.

Paramétrage. Le paramétrage du modèle est l'étape durant laquelle 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 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 des objectifs d'évaluation. Dans cette thèse, nous inscrivons le calibrage comme une des étapes, finale, du paramétrage.

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 :

$$F_{ij} = \frac{k \times M_i \times M_j}{d_{ij}^\alpha}$$

Le modèle comprend deux paramètres (k et α). k est un paramètre technique (encadré 3.3), ses fluctuations ne donnent aucune information supplémentaire 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 l'intensité des interactions entre les composantes du système modélisé.

À partir des variables 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 potentiel d'interaction 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.

La technique la plus simple pour paramétriser le modèle 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). Si 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 au 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 correspondant à une répartition aléatoire, potentiellement intégrée, à un état ségrégué 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%) des cellules qui seront occupées. Chaque agent est décrit 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 des 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 thématiquement 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. Notons toutefois que depuis un autre point de vue, qui illustre la relativité de cette typologie de paramètres, d peut aussi être vu comme un paramètre d'*input* ou de contexte. En effet, si l'on considère que ce paramètre représente le taux de vacances des logements, ou un quelconque proxy de la fluidité du marché du logement, son importance thématique devient alors majeure.

Objectif. Le paramétrage de ce modèle consiste à fixer un N constant et à faire varier d et S afin de 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 en effet de manière aléatoire quand ils ne sont pas 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 et basée sur une méthode d'essais-erreurs, 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 réplications 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 lire dans (DAUDÉ et LANGLOIS 2006)

b. Nous reprenons ici la notation $M(N, d, n, S)$ proposée par DAUDÉ et LANGLOIS (ibid., 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. Pour ce dernier, il s'agit d'un calcul résultant d'une estimation statistique, alors que dans le cas du modèle de Schelling, on mobilise l'approche d'essais-erreurs. Cette approche nous semble plus représentative 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 répétée : 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 différentes du paramétrage qui nous paraissent en fait complémentaires : 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), seul 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. On ne cherche en effet pas à reproduire, terme à terme, une répartition observée de deux populations. Le paramétrage permet de comprendre le modèle en 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 Paramétrier SimFeodal

Que ou quand paramétrier ? 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 N ou de d , qui définissent le contexte du modèle. 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 tenants de la modélisation modulaire (GRIMM, REVILLA et al. 2005 ; GRIMM et RAILSBACK 2012) ou multi-modélisation (PUMAIN, REUILLO et al. 2017) peuvent laisser entendre –, 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 1 000 foyers paysans correspondait 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 largement 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 grande partie empiriquement, n'avaient *a priori* 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 part substantielle 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 par un effet mécanique dû au nombre plus important d'individus, et donc à une densité accrue. 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

3.3. PARAMÉTRAGE DU MODÈLE SIMFEODAL

lors rendus ineptes, et il a fallu changer en profondeur la manière dont chaque paramètre et mécanisme interagissait avec les autres.

On peut illustrer les effets de ce changement de valeur de paramètre en analysant, de manière visuelle, l'évolution du modèle qui en a suivi. Une étude des « *commits* » de SIMFEODAL a été menée à cet effet. Les *commits* sont des enregistrements de l'état d'un ensemble de fichiers, et contiennent en tant que telle la liste des changements apportés depuis l'enregistrement (*commit*) précédent. Les *commits* peuvent contenir plusieurs modifications : un même *commit* peut porter sur le changements de plusieurs valeurs de paramètres par exemple. Les *commits* peuvent aussi contenir des modifications situées dans plusieurs fichiers différents. Comme le modèle SIMFEODAL est composé d'une dizaine de fichiers correspondant entre autre aux différents types d'agents, les *commits* concernent souvent plusieurs fichiers : le changement de mécanisme d'un type d'agent sera souvent matérialisé dans le fichier de l'agent correspondant, dans le fichier gérant les *outputs* du modèle, et par exemple dans le fichier régulant l'ordonnancement des mécanismes.

Ici, on a catégorisé, manuellement, les *commits* des premières versions de SIMFEODAL selon les modifications conceptuelles apportées : ajout de mécanisme, modification de valeurs de paramètres ou autre (nouvelles expériences, documentation, débugage, nettoyage de code, etc.) Un même *commit* peut contenir plusieurs ajouts de mécanismes, et/ou plusieurs modifications de valeurs de paramètres, et/ou encore plusieurs autres changements dans le code-source du modèle. Dans la figure 3.14, on a représenté ces *commits* selon la part de modifications relatives à chacune de ces catégories : une barre 100% noire signifie que le *commit* n'a porté que sur de l'ajout de mécanisme, une barre 50% noire et 50% grise correspond à un *commit* qui a autant porté sur l'ajout de mécanisme que sur la modification de valeurs de paramètres, et une absence de barre indique un *commit* dont tous les changements relèvent de la catégorie « autre ».

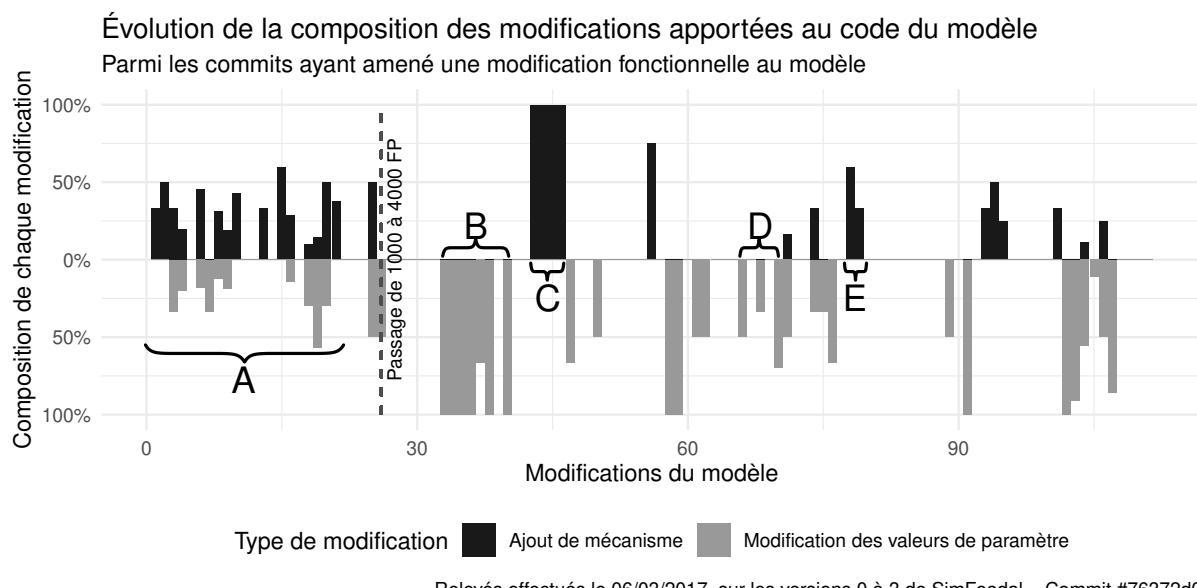


FIGURE 3.14 – Temporalité du paramétrage du modèle.

La figure 3.14 permet de constater un changement majeur suite à la modification du nombre de foyers paysans, entre les périodes A et B de l'évolution du modèle. Après le passage de 1000 à 4000 foyers paysans, suit ainsi une période intense de changements

de valeurs de paramètres (**B**). C'est une phase de calibrage, où l'on essaye d'ajuster les valeurs de chaque paramètre de manière à obtenir des résultats satisfaisants en sortie de simulation, résultats qui ont été bouleversés par le changement du nombre initial de foyers paysans.

L'étape **C** montre une succession d'ajouts et de changements dans les mécanismes : le calibrage des paramètres n'a pas été suffisant pour que le modèle produise une situation acceptable. Le calibrage ne suffisant pas, on revient en effet à d'autres phases de paramétrages, en modifiant les mécanismes de manière itérative. Entre les étapes **C** et **D**, on note quelques modifications de paramètres, quelques ajouts de mécanismes, et de nombreux *commits* catégorisés comme « autre » (il n'y a pas de barre) : cela correspond à des modifications plus substantielles dans le modèle.

L'enchaînement des étapes **D** et **E** ressemblent à celui de **B** et **C** : on recommence ainsi un cycle de calibrage-paramétrage-changements d'implémentation de manière à améliorer le modèle de manière itérative, selon le principe classique de l'essai-erreur. En catégorisant l'ensemble des *commits* du modèle jusqu'à la dernière version en date, nous sommes convaincus que ce motif réapparaît de manière fréquente et régulière.

Cet exemple, construit sur l'évolution effective de SIMFEODAL, illustre 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, le paramétrage ne peut pas être considéré comme une étape ultime, restreinte au calibrage, qui donnerait lieu à validation du modèle. Un paramétrage répété, régulier, donnant lieu à des évaluations systématiques, est ainsi la seule manière de garantir la comparabilité des différentes versions et sous-versions successives d'un modèle. Dans le cas contraire, on court 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 ajuster 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 empiriques⁴⁰, ou simplement de la correction d'approximations inexactes⁴¹. 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

40. Un exemple d'un tel choix est présenté dans le chapitre 5 (section 5.1.1.1), où l'on a choisi de faire passer les dimensions du monde simulé de 100×100 km à 80×80 km.

41. Comme c'est le cas dans l'exemple du passage de 1000 à 4000 foyers paysans présenté plus haut.

ne doit pas être guidé par l'évaluation du modèle.

Les **paramètres techniques** sont des candidats naturels au paramétrage, et plus spécifiquement à sa composante de calibrage. Puisqu'ils ne reposent sur aucune connaissance empirique, ils constituent ainsi des « leviers » 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. Le paramétrage des paramètres techniques est aisé mais n'apporte rien, d'un point de vue heuristique, en termes de connaissances supplémentaires sur le modèle où sur ce qui est modélisé. Ces paramètres sont toutefois très « pratiques » pour compenser le paramétrage des autres types de paramètres, comme dans l'exemple du modèle gravitaire (encadré 3.5). 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.

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 (nous y reviendrons largement dans le chapitre 5), 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.

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. Tout au long de cette thèse, nous avons souvent 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, TANNIER et al. (2017)</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.

N.B : 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.

À partir de la version « 2 » de SIMFEODAL nous avons partiellement suivi les règles de « versionnement sémantique » (ou « SemVer »⁴²), 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) qui sont organisées selon des versions 5.0, 5.0.1, 5.1, 5.1.1, etc. Le modèle passe à la version 6 quand les paramètres sont renommés et que les données en sortie ne sont donc plus directement organisées de la même manière qu'auparavant. Il y a alors rupture dans la rétro-compatibilité, et on passe de la version 5.1.2 à la version 6.0.

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 qui s'inscrivent dans la démarche d'essais-erreurs définie auparavant. Ces sous-sous-versions ne constituent donc pas nécessairement une étape supplémentaire dans l'évolution « linéaire » du modèle : les sous-sous-versions 5.0.1 et 5.0.2 sont concurrentes et correspondent à des essais. L'itération suivante du modèle (la version 5.1 par exemple) pourra s'appuyer sur n'importe laquelle de ces sous-sous-versions, par exemple la 5.0.1 plutôt que la 5.0.2.

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 SIMFEODAL⁴³ 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* met en évidence un dernier point qui nous paraît important. L'énumération menée dans cette thèse des versions, des sous-versions ou encore de tout changement du modèles, est exprimée selon un ordre chronologique, organisé au sein de la hiérarchie des versions, sous-versions et patches. Pour autant, comme indiqué dans le chapitre 1, la réalité de la construction d'un modèle, qui plus

42. « *Semantic versioning* », voir <https://semver.org/>.

43. 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>

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'aller-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 reconstruite visible dans le tableau 3.1. De la même manière que la version 5.1 pouvait être basée sur la 5.0.1 plutôt que sur la 5.0.2, la version 6.3 peut correspondre à une amélioration de la version 6.1, sans ré-utilisation de ce qui avait été modifié en 6.2.

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, il nous a semblé approprié d'illustrer ce discours autour de l'analyse *a posteriori* 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 était difficilement extensible à l'ensemble des *commits* de SIMFEODAL⁴⁴. Il nous cependant semblé intéressant et innovant, de mener une analyse exploratoire, moins détaillée (sans catégoriser manuellement chaque *commit*) mais plus étendue, de l'évolution du modèle SIMFEODAL sur la durée complète, de plus de 5 ans, de son cycle de co-construction.

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 la 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 l'unité « atomique » du versionnement, mais n'est pas nécessairement homogène pour autant, comme indiqué précédemment. 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 aurait aussi pu agréger les commits sur une période plus longue, par exemple de deux ou trois jours. Cela correspond dans les faits plus souvent au temps réel d'implémentation ou de test d'une changement dans le modèle. Cette durée représente cependant aussi celle des sessions de travail collectif avec l'ensemble des concepteurs de SIMFEODAL, sessions pendant lesquelles l'activité

44. La figure 3.14 résulte de la classification manuelle d'une centaine de *commits*. Pour chacun, il a été nécessaire d'en regarder le contenu *a posteriori*, de vérifier les mécanismes affectés, les paramètres ajoutés, modifiés, renommés, etc. À la date de la version 6.5 du modèle, l'historique de versionnement est composé de plus de 400 commits, et il aurait donc été nécessaire de reproduire ce travail méticuleux et coûteux en temps sur plus de 300 *commits* supplémentaires.

3.3. PARAMÉTRAGE DU MODÈLE SIMFEODAL

est plus intense et le nombre de changements et d'allers-retours aussi. L'agrégation à la journée nous a ainsi semblé la moins biaisée. C'est un raccourci assez important, sans doute peu adapté pour de nombreux *commits*, mais cela nous paraît utile d'une part pour diminuer le nombre d'éléments à analyser, et d'autre part pour diminuer la part des *commits* négligeables correspondant aux oublis et corrections décrits auparavant.

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 (total des nombres de lignes de codes modifiées). La figure 3.15 présente un exemple de ces agrégations.

Commit	Jour	Fichier	Nombre de lignes modifiées	
A	1	foyers_paysans.gaml	2	Médiane : 2 Somme : 8
A	1	seigneurs.gaml	5	
B	1	foyers_paysans.gaml	1	
C	2	foyers_paysans.gaml	15	Médiane : 4 Somme : 20
C	2	eglises.gaml	1	
C	2	poles.gaml	4	
D	3	seigneurs.gaml	20	Médiane : 20 Somme : 20

FIGURE 3.15 – Méthodologie d'agrégation des *commits*.

La somme des modifications étant par nature d'un ordre de grandeur bien plus élevé que la médiane⁴⁵, nous avons normalisé (réduction sans centrage) les valeurs afin qu'elles soient comparables graphiquement. La figure 3.16 est une représentation de cette analyse⁴⁶, qui permet de visualiser le « rythme » des changements de SIMFEODAL et d'en tirer quelques remarques.

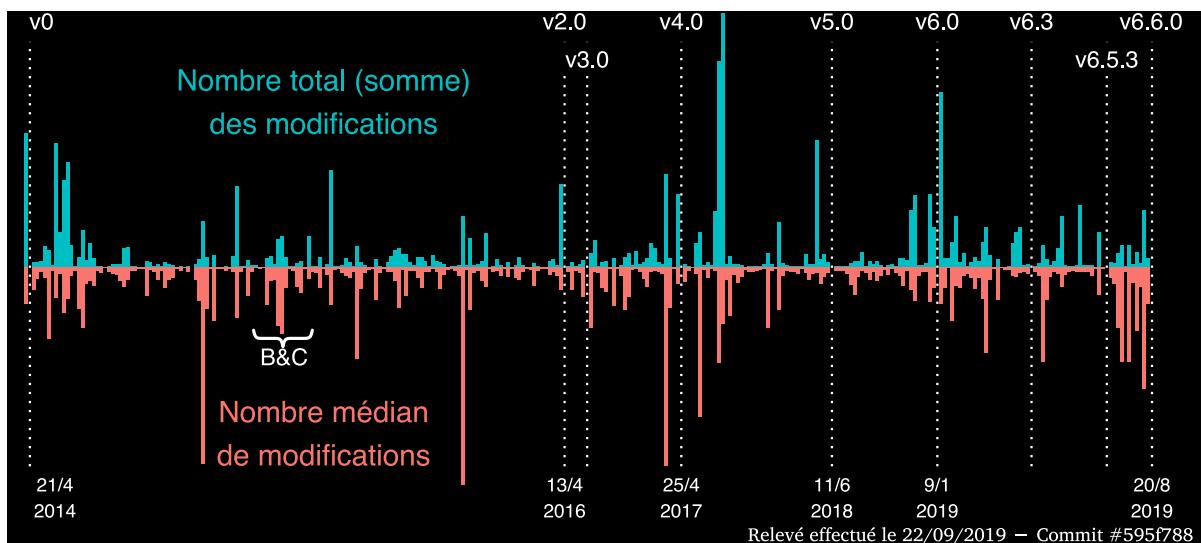


FIGURE 3.16 – Une exploration visuelle du rythme des changements de SIMFEODAL.

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.

45. Le changement médian maximal représente un changement de 300 lignes de codes, alors que la somme concerne, elle, plus de 1500 lignes...

46. Dans cette figure, les modifications regroupées dans l'accolade « B&C » correspondent aux phases B et C identifiées dans la figure 3.14.

On 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 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. Cette figure donne ainsi à voir un aperçu concret du processus de co-construction qui a été privilégié dans notre groupe de travail.

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 des résultats de simulation assez satisfaisants. 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 assurée⁴⁷, et l'on change alors de version.

47. 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.

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 3.16 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 à 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 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...).

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, 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.

Conclusion

Le paramétrage, et notamment sa composante de calibrage, ne peuvent être réduit à un exercice ultime et unique, qui viserai 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.

Dans ce chapitre, nous avons présenté et proposé une approche originale pour mener ces phases d'évaluation d'un modèle de simulation à base d'agents. Cette approche, que nous nommons évaluation visuelle, nous paraît très adaptée à l'évaluation de modèles exploratoires construits dans un contexte interdisciplinaire. L'évaluation visuelle propose une évaluation basée sur la multiplication des points de vue, au moyen de nombreux indicateurs de sortie. Nous pensons en effet que l'apport des différents acteurs de la modélisation, chacun avec son expertise thématique propre, permet une évaluation approfondie d'un modèle et que cette étape participe pleinement de la dimension heuristique de la modélisation. 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'approche d'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'évaluation 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.

4

Explorer visuellement des données de simulation massives pour analyser le comportement d'un modèle.

Sommaire

Introduction	182
4.1 Capter les sorties de SimFeodal	183
4.1.1 Masse des données	183
4.1.2 Tenir compte de la stochasticité du modèle - les réplications	187
4.1.3 Des réplications aux expériences	189
4.1.4 Des données aux indicateurs	190
4.2 Comment explorer les sorties de SimFeodal ?	192
4.2.1 Observer les simulations en direct ou <i>a posteriori</i>	192
4.2.2 Générer les indicateurs	196
4.2.3 Organiser les indicateurs en rapports paramétrables	198
4.2.4 Organiser les rapports : les <i>dashboards</i>	202
4.2.5 Interagir avec les rapports : exploration interactive	207
4.2.6 Explorer en comparant : la plateforme SimEDB	211
4.3 Organiser les données	215
4.3.1 Assurer la capacité d'interrogation des données	215
4.3.2 Structuration des données de SimFeodal	229
4.4 Une plateforme d'exploration de données de simulations : SimEDB	237
4.4.1 Contraintes	237
4.4.2 Construire une plateforme interactive pour l'exploration de sorties de simulation	246
Conclusion	262
Après-propos	262

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé et explicité une démarche d'évaluation de modèles basée sur une analyse qualitative d'indicateurs de sortie. Nous avons insisté sur le besoin de mener cette « évaluation visuelle » de manière fréquente et itérative, tout au long du cycle de développement du modèle. Au regard de la quantité d'indicateurs de sortie de simulation mobilisés pour l'évaluation de SIMFEODAL (voir section 3.2.3), cette tâche requiert de disposer d'un environnement adapté facilitant l'exécution de cette évaluation visuelle.

Dans ce chapitre, nous présentons la plateforme développée en réponse à ces besoins, SIMEDB. Cette plateforme dédiée à l'exploration interactive de données spatio-temporelles issues de simulation, a été conçue spécifiquement pour le cas des données issues de SIMFEODAL. Les raisonnements et les choix effectués pour la concevoir et la construire, que ce soit en matière de structuration des données ou d'interface graphique finale, sont toutefois génériques et pourraient ainsi être reproduits dans d'autres contextes d'exploration de données spatio-temporelles. Nous avons dès lors choisi d'adopter, dans ce chapitre, un raisonnement didactique, en présentant à chaque fois les contraintes spécifiques imposées par les données issues de SIMFEODAL, en les replaçant dans un contexte plus général, et en exposant une large partie des solutions possibles pour dépasser ces contraintes. Ce n'est qu'à l'issu de cet exposé des possibles que nous présentons et justifions les choix, méthodologiques et techniques, qui ont été fait pour aboutir à la plateforme SIMEDB.

Ce chapitre, plus technique que les précédents, est organisé en quatre parties qui suivent chacune cette forme de présentation. Le chapitre alterne entre une perspective consacrée aux données et une perspective dédiée à leur exploration. La première partie (section 4.1) présente ainsi les contraintes, notamment en termes de masses, liées à l'enregistrement des données produites par un modèle de simulation stochastique, descriptif et exploratoire. Dans un second temps (section 4.2), nous nous interrogeons sur la manière la plus appropriée de mobiliser ces données, c'est-à-dire d'organiser les indicateurs de sortie qui en sont issus, dans le but d'explorer le comportement de SIMFEODAL et de le comparer au travers des différentes expériences et versions du modèle. C'est aussi l'occasion de retracer l'historique des différentes pistes qui ont été suivies dans le cadre de cette thèse pour aboutir à la plateforme d'exploration SIMEDB. Les deux dernières parties sont consacrées à une présentation des besoins et contraintes techniques rencontrés pour la construction en tant que telle d'une telle plateforme d'exploration et pour que celle-ci soit aussi adaptée que possible aux besoins de ses utilisateurs, le groupe de travail qui a conçu et construit SIMFEODAL. Ces besoins et contraintes sont présentés en deux temps, selon qu'ils portent sur la nécessaire organisation des données (section 4.3), ou sur la plateforme interactive qui interroge ces données et génère les indicateurs de sortie qui seront évalués (section 4.4).

4.1 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, section 3.2). Quand le nombre d'indicateurs devient important, comme c'est le cas dans le modèle SIMFEODAL (section 3.2.3), 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 du modèle, démultipliant encore la masse des sorties, et avec elle, la complexité de leur analyse.

Ces différentes spécificités issues de simulation entraînent différentes contraintes, d'abord sur leur enregistrement, que nous détaillons ici. Ces contraintes sont transversales à d'autres types de modèles, et on peut noter que certains autres types de modèles peuvent faire face à d'autres contraintes. Cette partie vise à identifier les 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. C'est ce contexte spécifique de production des données et les contraintes qui lui sont associées que nous discutons ici. Les problèmes et les solutions rencontrés dans la production des données par des modèles s'inscrivent pour autant dans le cadre plus générique de l'enregistrement et du stockage des données, qu'elle qu'en soit la source.

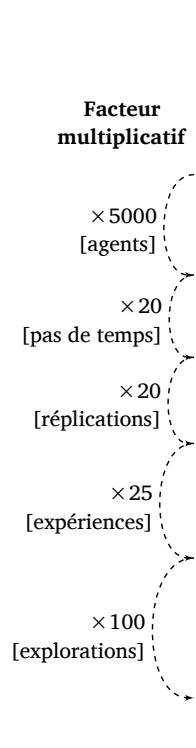
4.1.1 Masse des données

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 créer cette information dans le modèle, puis enregistrer les valeurs correspondantes, à chaque pas de temps, 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 informatiques afin d'en extraire les indicateurs (voir tableau 4.1). 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

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 chapitre 2, section 2.2.2.2), et l'on se satisfait donc de ce nombre d'itérations relativement faible.

CHAPITRE 4. EXPLORER VISUELLEMENT DES DONNÉES DE SIMULATION MASSIVES POUR ANALYSER LE COMPORTEMENT D'UN MODÈLE.

colonnes², ce qui serait assez raisonnable pour une unique simulation.



Facteur multiplicatif	Intitulé	DONNÉES		INDICATEURS		Type de question
		Quantité	Poids	Type	Quantité	
× 5000 [agents]	Un agent	1 ligne	≈ 200 octets	Visualisation en direct	Attributs de l'agent	<i>Le comportement individuel des agents semble-t-il plausible ?</i>
× 20 [pas de temps]	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>
× 20 [réplications]	Une simulation	100 000 lignes	≈ 20 Mo	Visualisations en direct	≈ 10 indicateurs	
× 25 [expériences]	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>
× 100 [explorations]	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 4.1 – 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.

Évolution des indicateurs. Dans le cadre d'un modèle exploratoire, il est très fréquent de faire évoluer les indicateurs au cours 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, à mesure que le modèle s'améliore, il peut être difficile d'en départager plusieurs versions concurrentes. On peut alors être amené 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 moyen de paroissiens à chaque pas de temps peut être un indicateur utile au départ, mais on peut finalement lui préférer 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 3.2), ce qui rend plus compliquée la mise en comparaison des différentes simulations. Avec une structure de données fixe et agrégée, l'introduction de nouveaux indicateurs ou la modification des indicateurs existants nécessiteraient alors de ré-exécuter systématiquement toutes les simulations précédentes pour obtenir les nouvelles valeurs souhaitées – une situation qu'il faut à tout prix éviter au risque d'accroître excessivement le nombre de simulations. Autrement dit, la production d'un tableau classique de données agrégés n'est pas adaptée au processus d'exploration du modèle, et cette solu-

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.

tion doit être écartée. Pour répondre à cette contrainte, il est en définitive plus adapté d'enregistrer pour chaque simulation des indicateurs non pas agrégés mais à l'échelle individuelle des agents (foyers paysans et paroisses par exemple), et d'opérer seulement dans un deuxième temps des calculs pour obtenir des indicateurs agrégés et comparables. Cette solution permet en outre de répondre à d'autres objectifs et contraintes du modèle SIMFEODAL.

Données agrégées et individuelles. Un second point invalide en effet un enregistrement classique par indicateurs agrégés : à termes, les indicateurs que nous cherchons à obtenir renvoient à des données individuelles et non agrégées. Si les informations sur le nombre de paroisses, leur superficie moyenne, ou encore le nombre moyen de paroissiens que chacune dessert nous intéressent, elles ne sont pas suffisantes. En effet, nous cherchons également à dresser une cartographie des résultats du modèle, par exemple en représentant la localisation et les aires d'attraction des paroisses. L'enregistrement par indicateurs agrégé ne permet aucun cas d'obtenir de telles informations, qui nécessitent, par définition d'enregistrer la géométrie de chaque paroisse à chaque pas de temps, puisque les configurations spatiales (localisation de chacune et donc distribution spatiale de l'ensemble) varient 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 3 000 lignes³ et une dizaine de colonnes⁴. L'enregistrement systématique de l'état de chaque agent à chaque pas de temps est toutefois bien plus lourd 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 satisfaction 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 unique simulation est déjà contraignant. 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 4.1.

Coût temporel des simulations. Un dernier aspect de l'exploration de données issues de simulations, primordial, vient finir d'invalider l'approche d'enregistrement direct des indicateurs : le coût temporel. L'exécution d'une simulation requiert un cer-

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.

tain 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. En l'état actuel du modèle, la production des données a donc un coût temporel élevé.

Qui plus est, ce coût est fortement dépendant du nombre de simulations exécutées, qui est d'autant plus important dans le cas d'un modèle exploratoire. Comme on l'a vu, l'enregistrement direct d'indicateurs déjà agrégés impliquerait, lorsque ces derniers sont modifiés, que l'ensemble des simulations précédentes soient adaptées et ré-exécutées au fur et à mesure de l'exploration du modèle.

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.

En définitive, les objectifs d'analyse et d'interprétation que nous nous sommes fixés et le caractère exploratoire du modèle SIMFEODAL aboutissent à la création d'une grande masse de données à enregistrer et traiter. Enregistrer l'ensemble des variables d'un modèle est aisément 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, 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 relative 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, 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 4.1), 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 5, on est passé de 4 000 foyers paysans à 40 000. On peut donc décupler les valeurs des colonnes « quantité » et « poids »....

4.1.2 Tenir compte de la stochasticité du modèle - les réPLICATIONS

Un modèle stochastique. Comme on l'a vu dans le chapitre 3 (section 3.3.1.2), une unique simulation ne suffit pas à évaluer le modèle. Tout d'abord, SIMFEODAL est 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, comme c'est le cas par exemple pour le choix de déplacement ou non d'un foyer paysan (cf. section 2.3.7). Dans le cas de ce mécanisme, un foyer paysan mobile se déplacera selon une probabilité dépendant de sa satisfaction. L'existence d'une probabilité implique, par définition, qu'il y a 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. 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. Les comportements issus de ces probabilités extrêmement faibles constitueront néanmoins des résultats contre-intuitifs dans le modèle : ce seront des *outliers* (cas singuliers) qu'il sera nécessaire d'identifier comme tels dans l'analyse des sorties du modèle. L'aléa a donc un poids important dans ce type de mécanisme.

De manière plus globale, par ailleurs, l'aléa est en fait au cœur de la conception du modèle SIMFEODAL, puisque l'ordre d'exécution, c'est-à-dire l'ordre dans lequel les agents sont appelés pour exécuter leurs mécanismes, est aléatoire. Or, l'ordre d'exécution a un impact important sur les indicateurs de sortie de simulation, sans que cet impact puisse être caractérisé au moyen d'indicateurs agrégés. Par exemple, les seigneurs peuvent créer des châteaux, sous condition de puissance (cf. section 2.3.11). 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. Une grande partie des mécanismes sont donc sensibles à l'ordre d'appel, et il est 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 comportement de chaque agent serait régulé par tant d'états aléatoires qu'on entrerait 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 entrer ici dans les détails des implications et raisons de ceci (voir l'analyse de sensibilité, section 5.2), on peut simplement retenir qu'un modèle tel que SIMFEODAL est extrêmement sensible aussi bien aux conditions initiales qu'aux différents tirages aléatoires.

À titre d'illustration, 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 restreint. Seul un énorme agrégat émergerait donc, qu'aucun pôle ne serait dès lors susceptible de diviser. 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. En d'autres termes, une situation initiale donnée peut aboutir à des situations très diverses et parfois complètement contraires.

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 les laisser influencer excessivement 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. En outre, des situations 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'auto-renforcent. 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 mais pas impossibles.

Enregistrement des réplications. Du fait des contraintes liées à la stochasticité et à la complexité du modèle, on ne peut donc pas raisonner sur une unique simulation pour évaluer un jeu de paramètres. 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'entièr diversité des sorties de simulations issues de variation de la graine aléatoire, il est donc nécessaire de mener

plusieurs réplications de chaque simulation (une expérience), 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. 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 (ligne « expérience » du tableau 4.1).

4.1.3 Des réplications aux expériences

Comme décrit dans le chapitre 3 (tableau 3.1), le paramétrage de SIMFEODAL a demandé plusieurs étapes. Parmi ces étapes, les « sous-versions » correspondent souvent à des « expériences », faites d'essais et d'erreurs, et qui font varier 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, autrement dit, de réaliser des dizaines d'expériences. 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, seraient dès lors considérées comme inutiles. Le processus de conception et de paramétrage d'un modèle n'est pourtant pas linéaire, et on peut avoir besoin de comparer n'importe quelle version avec n'importe quelle autre version, par exemple pour identifier si une modification ajoutée au modèle plusieurs versions auparavant n'est pas erronée.

Il est donc nécessaire de conserver les résultats de chacune des expériences, ce qui joue un rôle multiplicatif dans la masse de données à conserver (ligne « modèle paramétré ou calibré » du tableau 4.1).

En supposant que le modèle ait compté environ 25 versions⁸, on obtient environ 500 simulations à stocker, puis à analyser et à comparer. Cela représente une somme considérable de données (voir tableau 4.1), qui se chiffrent en dizaines de millions d'enregistrement⁹. En matière de stockage, il ne s'agit jamais que de quelques gigaoctets de données, qui sont pourtant à la limite de ce que l'on peut traiter sur un ordinateur

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. Dans SIMFEODAL, par exemple, on distingue 6 versions « majeures » (cf. tableau 3.1, elles-mêmes composées de 4 à 10 sous-versions).

9. $20 \text{ [pas de temps]} \times 5000 \text{ [agents]} \times 20 \text{ [réplications]} \times 25 \text{ [jeux de paramètres]} \approx 100\,000\,000$ de lignes enregistrées pour les agents (4 000 foyers paysans et environ 1 000 autres agents).

individuel¹⁰.

Enfin, on n'a présenté ici que les expérimentations issues des étapes de paramétrage. Les phases suivantes, visant à l'exploration du comportement du modèle (analyse de sensibilité, calibration, etc.), demandent d'exécuter, et donc d'enregistrer, un nombre encore plus important de simulations.

4.1.4 Des données aux indicateurs

Dans l'ensemble, l'enregistrement et la sauvegarde des données issues de simulations constituent pour les modèles de simulation basés sur de nombreux agents et mécanismes, et en particulier pour SIMFEODAL, une contrainte importante vis-à-vis de l'exploration du comportement de ces modèles.

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 et accessible de la géographie quantitative, ne laissant par exemple pas la possibilité d'utiliser les outils classiques à interface graphique. 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 calcul importantes, sans toutefois justifier encore l'usage de technologies de calcul intensif¹¹. 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 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 donc mener à la production d'indicateurs, plus facilement utilisables et interprétables par les thématiciens, mais qui doivent être nombreux et divers aussi bien dans leur forme que dans les caractéristiques des processus qu'ils décrivent (section 3.2.3). Les mêmes raisonnements « multiplicatifs » que pour les données s'appliquent ainsi aux indicateurs. Pour une expérience donnée, on peut rendre compte de la variabilité des réplications directement à partir des indicateurs, par exemple en représentant les valeurs sous forme de *box-plots* (une représentation graphique que nous avons choisi de largement utiliser dans ce travail).

10. 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 4.1), 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.

11. 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.

Pour comparer les différentes expériences, c'est-à dire analyser la variabilité inter-expérience, il n'est pas souhaitable de créer des indicateurs globaux. 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 centaines¹² d'indicateurs (tableau 4.1).

Le choix ayant été fait de mener une comparaison visuelle (section 3.1.4), celle-ci sera dès lors difficile du fait de ce très grand nombre d'indicateurs. En sus de la contrainte de l'enregistrement et de la production des indicateurs, le verrou majeur à l'exploration du comportement de SIMFEODAL est donc la simple capacité à visualiser et à explorer l'ensemble des indicateurs de sortie. Cette visualisation doit pourtant être rendu accessible y compris pour un auditoire non habitué à la manipulation de nombreuses données et sorties quantitatives.

12. En considérant ainsi une trentaine d'indicateurs, on obtient donc $30 \text{ [indicateurs]} \times 25 \text{ [jeux de paramètres]} \approx 750$ indicateurs uniques.

4.2 Comment explorer les sorties de SimFeodal ?

Pour évaluer de manière approfondie une expérience (voir tableau 4.1) 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 pour chaque sortie, 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 en effet plutôt à explorer le comportement du modèle en fonction des mécanismes et des valeurs de paramètres choisis, de manière à construire 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.

4.2.1 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 plateformes de modélisation agent mettent d'ailleurs régulièrement en avant les possibilités de représentations qu'offrent leurs environnements¹³. Visualiser le déroulement d'un modèle « en direct » (« *online* » dans GRIGNARD et DROGOUL 2017), c'est-à-dire au sein de la plateforme 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).

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

13. 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>).

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 implantée 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, au sein de la plateforme GAMA, de quelques graphiques correspondant à des indicateurs étudiés permet d’assurer un rôle de filtrage, grossier, à l’exécution d’une expérience. 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 mineures du modèle, qu’un *bug* n’a pas été introduit involontairement. Chaque type de visualisation a ainsi sa fonction propre.

Le recours à ce type de visualisation en direct des simulations ne peut toutefois être utilisé pour des analyses plus poussées que ce rôle de ce pré-filtrage, en raison de plusieurs 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-agents¹⁴ permettent toutefois de mener concomitamment 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.

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

14. GAMA dans sa dernière version (1.8) par exemple, voir <https://gama-platform.github.io/wiki/RunSeveralSimulations.html>.

analyse approfondie.

Tout d'abord, il est concrètement difficile de représenter tous ces indicateurs au sein de l'interface graphique d'une plateforme de simulation agent, comme on peut le remarquer, par exemple en figure 4.1. Sur celle-ci, l'espace au centre est occupé dans les deux cas par trois indicateurs temporels et numériques (l'ensemble des indicateurs sont rangés dans des onglets à droite), qui occupent une place déjà importante et rendent 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 cognitif suffisant pour observer l'ensemble des indicateurs disponibles. 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 notre pratique d'évaluation non-linéaire, qui est plus généralement celle utilisée par la plupart des chercheurs. L'évaluation n'est pas une étape unique et finie, il est fréquent de devoir 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 rationnel 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-modélisateur, 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 nécessiterait d'y consacrer de trop nombreuses heures et ressources informatiques.

L'évaluation d'un modèle interdisciplinaire et exploratoire ne peut donc 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 tel modèle à évaluation visuelle requièrent donc que

4.2. EXPLORER LES SORTIES

les indicateurs soient accessibles et explorables à des temporalités différentes, par des chercheurs différents, depuis des lieux différents. 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 « en direct » comme méthode principale d'exploration.

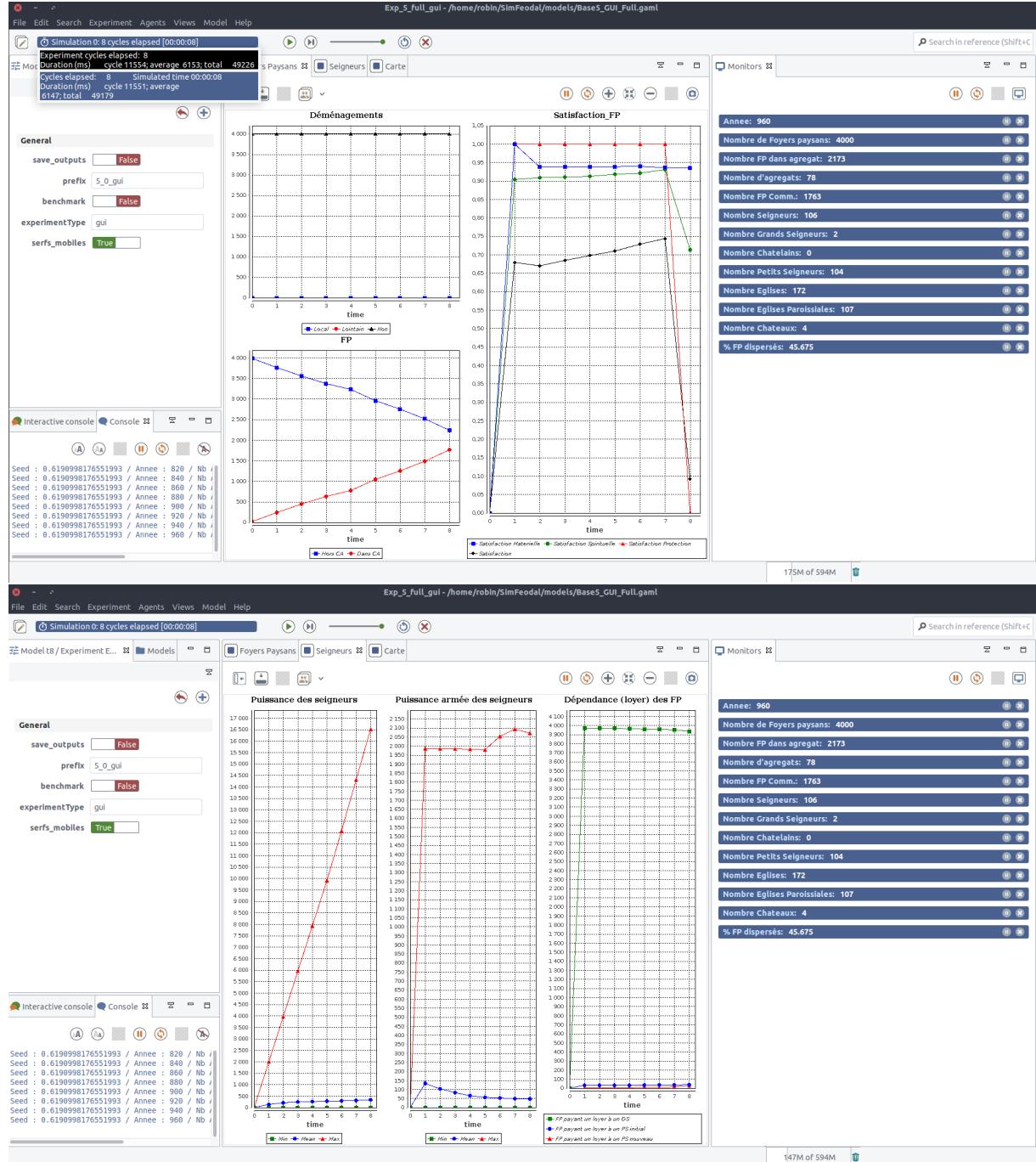


FIGURE 4.1 – Indicateurs intégrés à l'interface graphique interne de SIMFEODAL.
N.B : Dans ces captures d'écrans, il s'agit d'indicateurs liés aux foyers paysans et aux seigneurs.

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 4.1 et 4.2). La visualisation en direct n'est donc pas mobilisable en tant que méthode d'évaluation principale, mais elle peut 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.

Pour cette étape de pré-filtrage, nous avons donc choisi de développer une interface graphique très sommaire, au sein de la plateforme de simulation GAMA, qui permet 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 4.1), ainsi qu'une représentation cartographique (figure 4.2) utile à une analyse rapide du comportement d'ensemble du modèle.

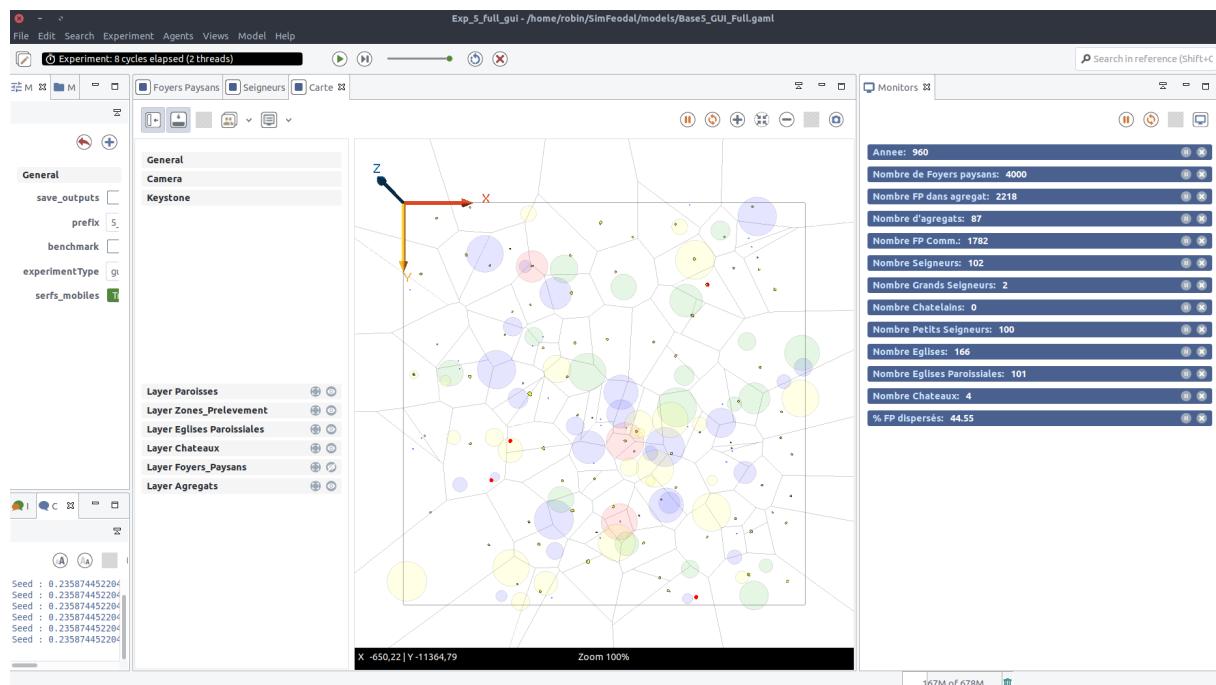


FIGURE 4.2 – Visualisation intégrée à l'interface graphique interne de SIMFEODAL : cartographie synthétique de l'espace modélisé.

N.B. : les cercles visibles correspondent aux zones de prélèvement, dont les couleurs indiquent les types (foncier en bleu, haute-justice en rouge et autres droits en jaune).

Cette interface graphique permet de renforcer l'outillage d'évaluation de SIMFEODAL en permettant une première étape de filtrage des simulations. Pour mener une analyse conjointe et complète des réplications du modèle, en revanche, nous avons besoin d'un outil entièrement adapté aux besoins et situés en aval de l'exécution de nombreuses réplications. L'ajout de cette interface graphique vient donc renforcer l'outillage d'évaluation de SIMFEODAL. À 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.

4.2.2 Générer les indicateurs

La production des indicateurs doit 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 4.1.4). 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. De plus, pour les raisons évoquées dans le chapitre 1 (section 1.4.4), 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 choix adapté à nos besoins. Pourtant, avec une trentaine d'indicateurs à produire pour chaque expérience, donc de manière répétée, 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.

Des outils CLI pour l'analyse de données. De plus, de manière plus technique, on peut remarquer que les différents indicateurs de sortie de simulation choisis (voir section 3.2.3) présentent souvent des caractéristiques communes, aussi bien dans le traitement nécessaire que dans les formats (graphiques) produits. Par exemple, la grande majorité des indicateurs repose 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'expérimentation¹⁵. 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 minimales (nom de l'agent, type d'agrégation, etc.). Le recours à des traitements en *CLI* permet ainsi un simple copier/coller du code, voire la création de fonctions dédiées, pour effectuer ces traitements très récurrents.

Des outils CLI pour la visualisation. De même, au niveau des sorties graphiques, la structure des graphiques en elle-même est assez largement identique entre les différents indicateurs : on représente les pas des temps (les années simulées) en abscisse, un indicateur statistique en ordonnée, et la variabilité sous la forme de *box-plot* minimalistes (« *minimal boxplot* », promus par Edward Tufte pour minimiser le

15. 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.

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 le « pipeline de visualisation », section 4.4.2.1), 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, d'implémenter et de répliquer 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.

Enfin, 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 et 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.

4.2.3 Organiser les indicateurs en rapports paramétrables

Pour évaluer un modèle à l'aide de multiples indicateurs, du point de vue de la manipulation, la création de fichiers informatiques indépendants correspondant aux différents indicateurs de sortie de simulation est extrêmement pratique : un fichier pour chaque indicateur, pour chaque expérience par exemple. 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, 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 entre les expériences. Pour cela, nous avons choisi de structurer les indicateurs de sortie de simulation au sein de « rapports ». Cela permet, même en présence de nombreuses expériences, de rassembler tous les 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 simple de conserver des traces de l'ensemble des versions et sous-version d'un modèle. Cette documentation permet ainsi de garantir une certaine pérennité au modèle et simplifie le travail rétrospectif de caractérisation de son évolution. Deuxiè-

lement, l'intérêt majeur de la structuration en rapports est surtout de faciliter la comparaison des expériences. On peut ainsi, par exemple, placer côté à côté, visuellement, deux rapports rendant compte de deux expériences différentes. En les faisant défiler simultanément, on pourra alors évaluer leur similitude et comparer, indicateur par indicateur, leurs résultats respectifs, de manière visuelle et intuitive.

Les formes que peuvent prendre les rapports sont extrêmement diverses, et c'est aussi le cas des modalités de leur production. Le mode de production le plus simple et courant consiste à produire manuellement le rapport en insérant les indicateurs adaptés au fur et à mesure, par exemple dans un traitement de texte. À l'opposé, il existe des modes de création entièrement automatisés de rapports complets, comprenant par exemple des descriptions et commentaires textuels générés à la volée en fonction d'expressions conditionnelles¹⁶.

Pour SIMFEODAL, nous avons choisi de restreindre au maximum la manipulation manuelle. Nous souhaitions 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 standardisées et automatiques, forcément moins abouties que les analyses de chacun des co-concepteurs du modèle. Le rapport produit n'intègre donc que les indicateurs, sous forme de tableaux et de graphiques (figure 4.3). Ces indicateurs sont organisés par partie, en l'occurrence en fonction du type d'entités et de comportement qu'ils décrivent.

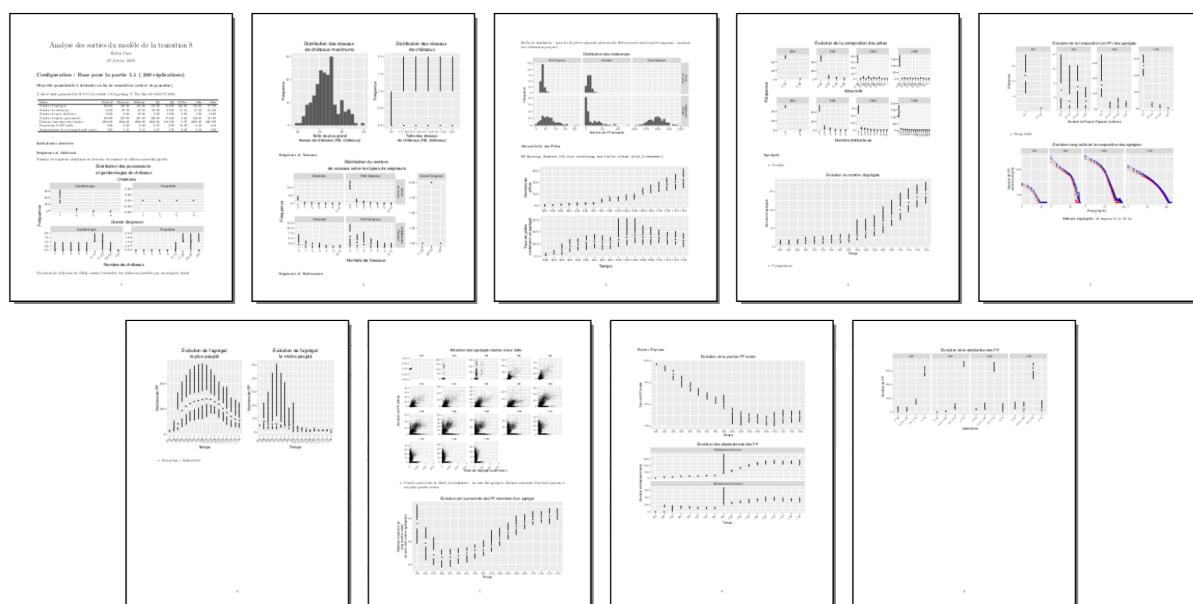


FIGURE 4.3 – Un exemple, miniaturisé, de rapport automatique généré pour une expérimentation (étape 0) de SIMFEODAL.

N.B. : Le rapport complet est visible en Annexe B.

16. 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. <http://outils.observatoire-des-territoires.gouv.fr/sofie/>

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. La reproductibilité est d'abord théorique (section 1.4.4), puisque les résultats de simulation doivent pouvoir être analysés et reproduits par des chercheurs potentiellement intéressés. Mais cette recherche de reproductibilité remplit aussi un besoin effectif et pratique, du fait des méthodes de modélisation suivies. Comme nous l'avons exposé auparavant (sections 4.1.2 et 4.1.3), ces méthodes 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 un calcul et une production simplifiés et rapides des indicateurs sur les nouvelles données. Cela permet un examen des sorties de simulation presque immédiatement après leur exécution.

Le caractère fixe d'un rapport automatisé se base 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. L'automatisation permet donc de mener une seconde évaluation – après le pré-filtrage constitué par l'observation d'indicateurs en direct – du bon déroulement « interne »¹⁷ du modèle.

Un autre intérêt majeur des rapports, déjà pointé en avantage des outils de type *CLI* est leur adaptabilité. Les indicateurs à examiner sont nombreux et surtout, évolutifs, et 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 sur un code-source unique, générique aux simulations. 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, sans avoir à ré-exécuter toutes les simulations.

Dans le cas de SIMFEODAL, caractérisé par de fréquents changements dans la forme et le

17. Au sens de l'évaluation interne, c'est-à-dire du bon fonctionnement, exempt de *bugs*, du modèle de simulation implémenté. Voir l'encadré 3.1.

calcul des indicateurs, cela a représenté un gain de temps et d'efficacité très conséquent. Par exemple, lors de certaines phases de paramétrage, nous pouvions 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, nous avions à re-générer 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 (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. section 1.4.4). 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 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 d'approcher de cette ambition. Pour cela, on peut assembler 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, le travail par générations constitue un choix intermédiaire qui permet de limiter le nombre de variantes de rapports. Cette approche suit les grandes lignes du développement logiciel général (voir section 3.3.2.3). 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 assurée¹⁸.

18. Par exemple, un fichier de dessin vectoriel créé avec le logiciel Adobe Illustrator 15.0 ne sera pas

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 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 – au sein de grandes générations, à chaque changement structurel des mécanismes ou données produites par le modèle (voir tableau 3.1).

Les rapports, des instruments suffisants ? À 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 4.1). 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 aisément 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 manipulation conjointe des rapports devient complexe, tout autant que d'avoir une vision globale des résultats principaux de chaque expérience.

4.2.4 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 la 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 utiliser 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

4.2.4.1 Les *dashboards*

Cette logique, assez universelle désormais, est celle qui préside à la création des nombreux « tableaux de bord », ou « *dashboards* » que l'on voit émerger depuis la fin des

lu correctement avec une version 14.0. Ce fichier présentera toutefois un compatibilité parfaite avec les versions 15.1 à 15.n du logiciel.

années 1990. Rob Kitchin et ses co-auteurs définissent ainsi les *dashboards*, notamment en s'appuyant sur les travaux de FEW :

« 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 ([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 mais non technique (par exemple mathématique) 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, 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, etc.) 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, etc.), se démultiplient et se diversifient aussi en conséquence.

Inspirés autant par l'usage en informatique décisionnelle que par l'usage géographique, nous considérons que ces outils peuvent se révéler utiles dans l'évaluation de modèles de simulations complexes, et en particulier dans une démarche de co-construction in-

terdisciplinaire. Les enjeux sont en effet les mêmes : permettre à des thématiciens de comprendre des données complexes. Dès lors, la logique qui anime les dashboards répond à nos besoins. Il s'agit de permettre une évaluation et une analyse du modèle, par des thématiciens, par le biais d'indicateurs clefs et d'indicateurs secondaires (section 3.2.2), présentés sous la 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*.

4.2.4.2 SimVADB

Les *dashboards* font souvent usage 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 symbolisés¹⁹. 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 4.4).

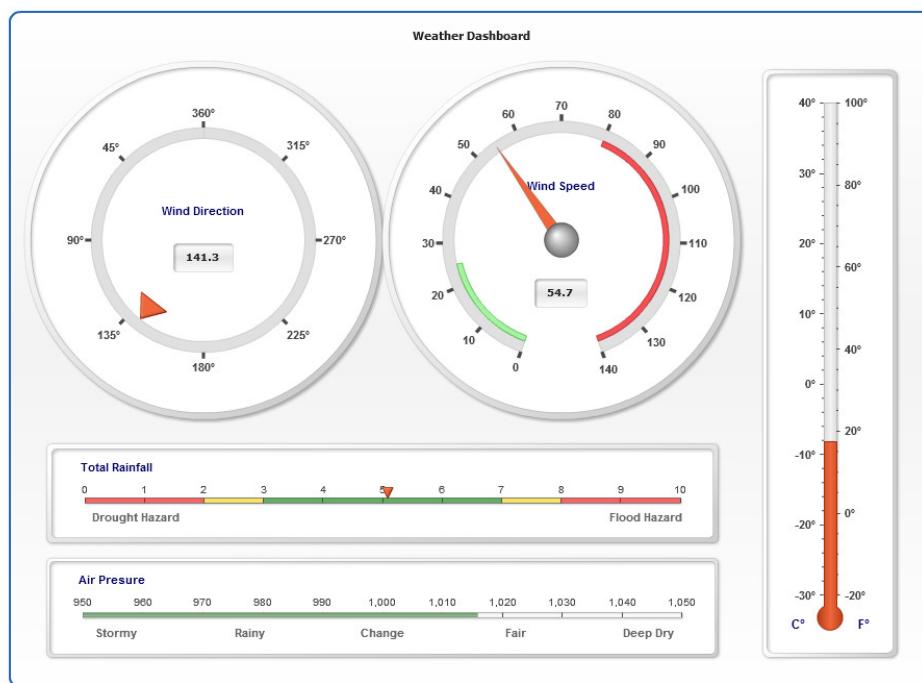


FIGURE 4.4 – Un exemple de représentations visuelles courantes dans les *dashboards*. Tiré de PANDRE (2011)

Pour SIMFEODAL, les indicateurs étant assez fortement conçus et structurés, 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, nous cherchions à produire un *dashboard* au plus proche, visuellement, des rapports automatiques qui les précédait.

On a pour cela développé un premier *dashboard* adapté à SIMFEODAL, nommé Sim-

19. Voir par exemple la page Wikipédia consacrée : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Skeuomorphisme>

VADB²⁰. 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 (R). 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 suffi 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 de la figure 4.5 illustrent la facilité de cette modification : il s'agit uniquement de placer les différentes fonctions dans des blocs graphiques. Ces modifications minimales augmentent toutefois considérablement la convivialité et la facilité de l'analyse de résultats de sortie d'un modèle en passant d'un rapport statique à un rapport interactif.

<pre># 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') [...]</pre>	<pre>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', [...]}</pre>
--	--

FIGURE 4.5 – Pseudo-codes du rapport automatique (gauche) et du dashboard correspondant (droite).

Au niveau de l'interface utilisateur, SimVADB permet de choisir, via un menu de sélection (partie de gauche dans la figure 4.6), les expériences passées dont on veut visualiser les indicateurs de sortie (partie de droite). Les onglets de premier niveau représentent les types d'agent, et des onglets de second niveau permettent de visualiser l'ensemble des indicateurs associés à ces agents (partie de droite).

20. Simulation Visual Analysis DashBoard.

Cette application a rapidement été remplacée par l'itération suivante (SIMEDB, voir section 4.2.5), 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>

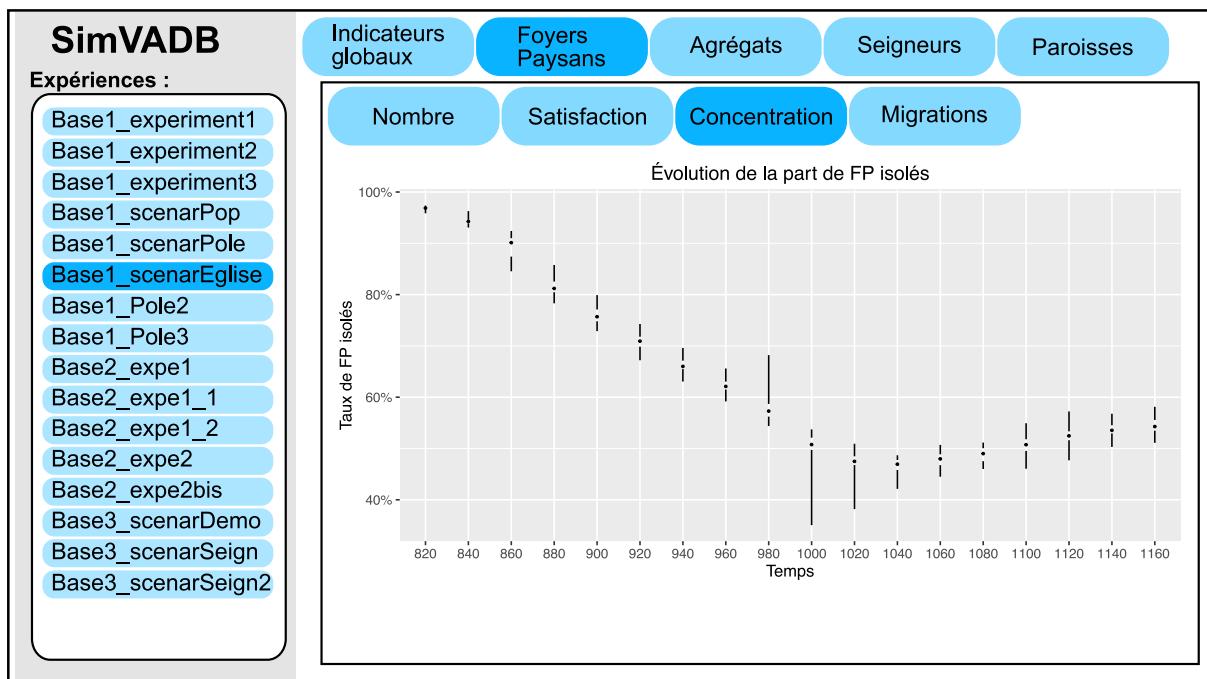


FIGURE 4.6 – Un *mock-up*²¹de la première interface de SimVADB, un *dashboard* dédié à la visualisation des indicateurs de sorties de simulation de SIMFEODAL.

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 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. En effet, et comme illustré dans la figure 4.6, les noms d'expériences tendent à s'allonger, et avec l'augmentation de leur masse, il était 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 impliquait 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 plateforme d'affichage des indicateurs, basé sur une sélection des expériences depuis leur nom, s'était donc révélé inadapté à la sélection et à l'exploration des sorties de SIMFEODAL.

Dépasser le « présentoir » de données. Au delà des limites du mode d'interaction, qui aurait pu être amélioré, l'approche comparative nécessaire au paramétrage, à l'éva-

21. Un *mock-up* est une « maquette à l'échelle », ou un prototype, permettant de représenter une interface graphique de manière schématique.

luation et à l'analyse des différentes versions du modèle apportait un autre problème. Si l'utilisation d'un outil de présentation dynamique tel qu'avait été construit SimVADB était plus adapté que la multiplication de rapports linéaires et statiques, il restait insuffisant pour mener à bien de multiples comparaisons. La succession d'analyse visuelle demeure peu adaptée pour appréhender l'étendue des changements apportées par une modification des valeurs de paramètres.

4.2.5 Interagir avec les rapports : exploration interactive

Face à la démultiplication des expérimentations, consécutive aux nombreuses étapes de paramétrage de SIMFEODAL (section 3.3.2.3), il a donc fallu repenser la plateforme 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, nous avons décidé d'adopter une posture plus proche de l'exploration du modèle en elle-même. Cette seconde approche a consisté à caractériser les simulations par leurs spécificités intrinsèques, c'est-à-dire la combinaison de valeurs de paramètres qui les rendent uniques et constitue ainsi une signature de chaque expérience et réPLICATION. Ce faisant, au sein de la plateforme 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. En d'autres termes, il fallait passer du descriptif, quelle qu'en soit la méthode, à du comparatif.

Du point de vue de l'interface utilisateur, cela impliquait que la sélection ne se fasse plus par un unique critère (le nom de la simulation), mais au contraire par des critères multiples. Par une succession de sélections, chaque paramètre pouvait constituer un nouveau filtre dans lequel on avait à choisir les valeurs à interroger (voir l'encadré 4.1).

Visualiser avec des coordonnées parallèles. 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. 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 l'encadré 4.1, ou encore FEW 2006b 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 statistiques²² (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

22. Ici, chaque expérience est un individu statistique. Ce dernier est caractérisé par un ensemble de variables, les différents paramètres de l'expérience, et les modalités de ces variables, 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.

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 4.1). Ce type de sélection se révèle en effet souvent plus efficace et intuitive qu'une sélection textuelle :

« 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 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 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, ici spatiale : « 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 coordinates. » (FOTHERINGHAM 1999).

Appliqué aux données de SIMFEODAL, ce mode de visualisation et d'interaction (figure 4.8) se révèle particulièrement efficace pour sélectionner les configurations de paramètres à explorer. Ainsi, en « brossant » quelques filtres manuellement (figure 4.8 - A), on arrive rapidement à isoler une expérience spécifique.

Encadré 4.1 : Construction et utilisation interactive d'un graphique en coordonnées parallèles

La figure 4.7 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, dans cet exemple, cette opération renvoie le seul individu statistique répondant aux deux sélections graphiques (G).

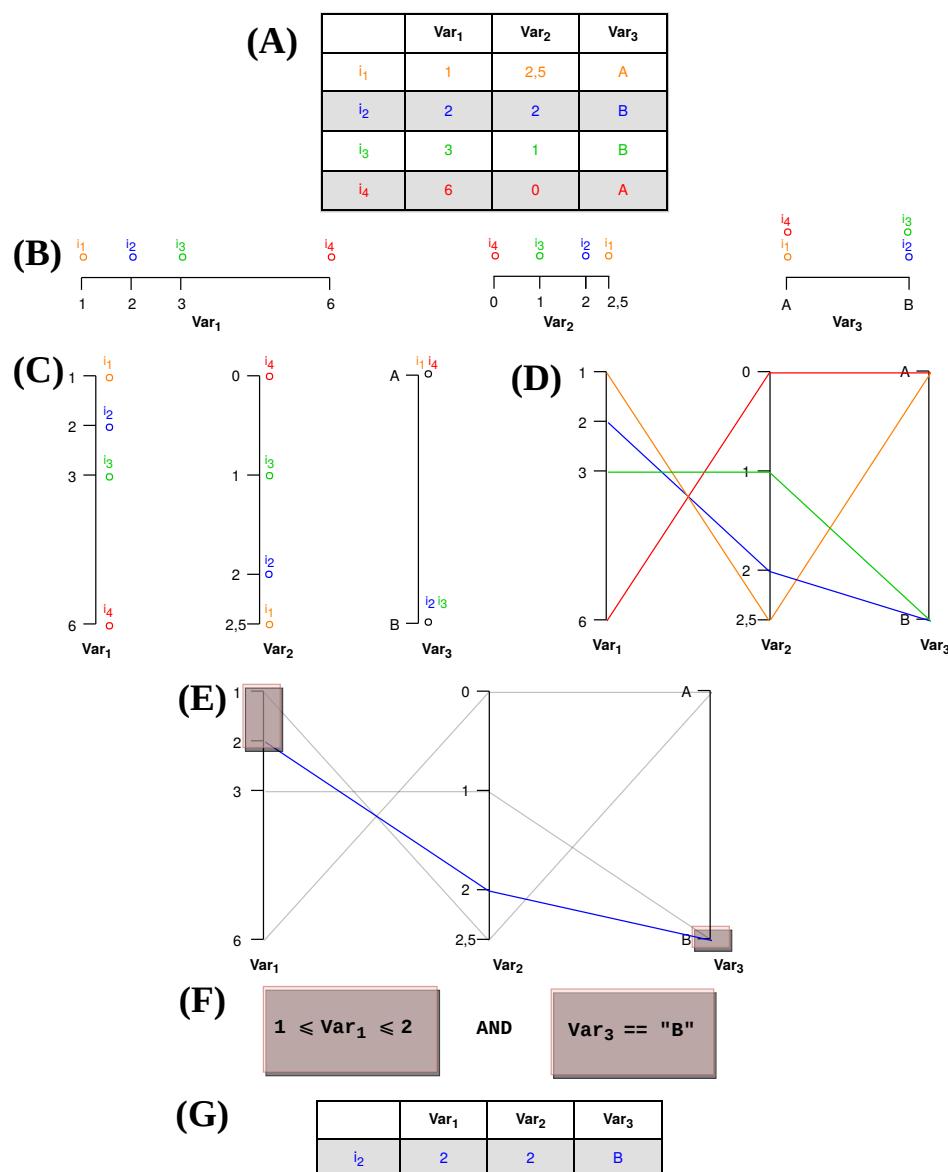


FIGURE 4.7 – Construction d'un graphique en coordonnées parallèles et sélection interactive.

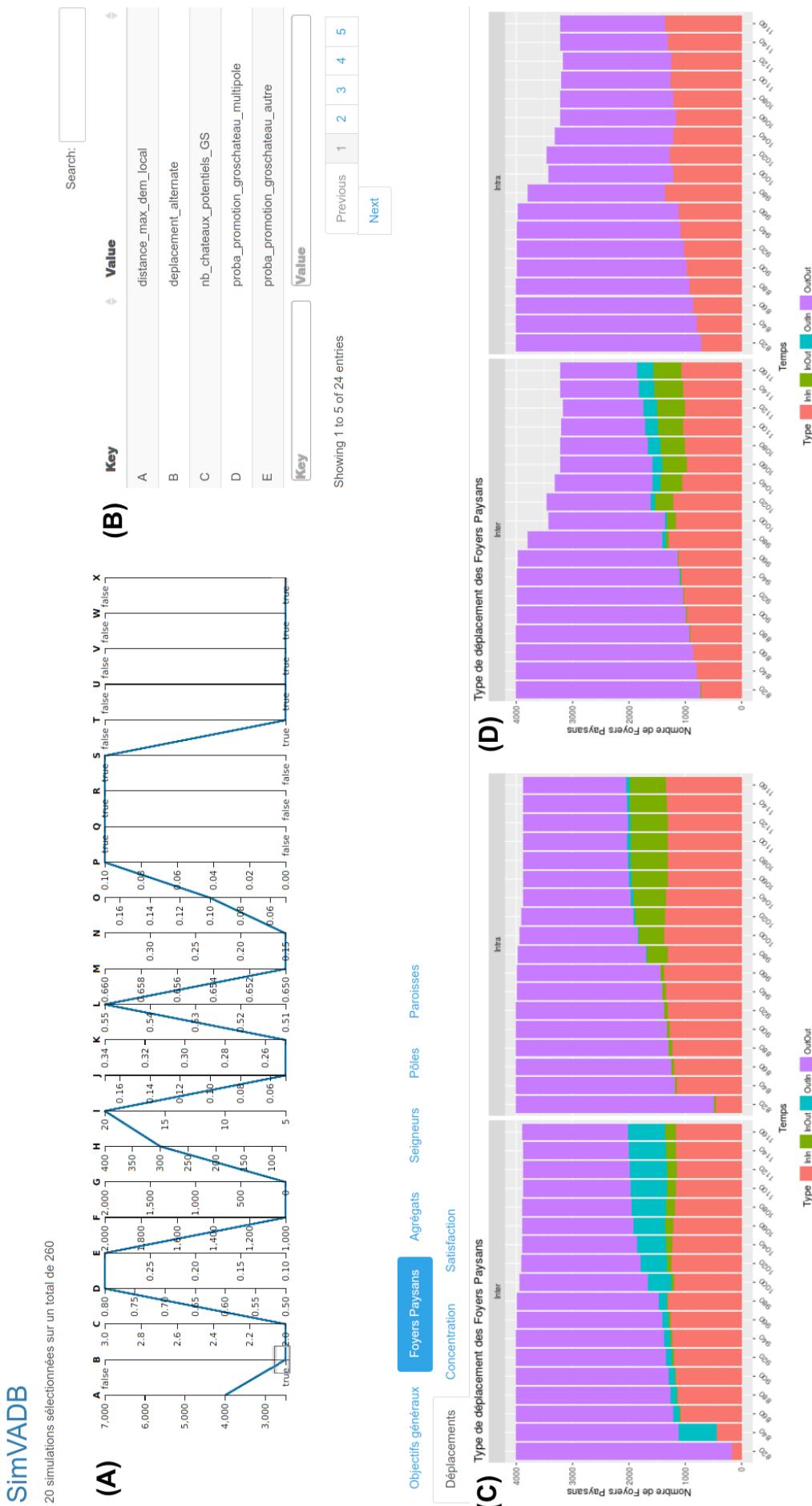


FIGURE 4.8 – Utilisation des graphiques en coordonnées parallèles dans SimVADB pour explorer visuellement les indicateurs de sortie de simulation de SIMFEODAL.

FIGURE 4.8 – Suite de la légende –

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 pour une expérience dans laquelle le paramètre « B » 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 4.8 - C), et les valeurs spécifiques des indicateurs de l'expérience choisie (figure 4.8 - 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 similaires²³, 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 précise des sorties de simulations, en particulier dans l'analyse de l'impact de variations fines de valeurs de paramètres.

4.2.6 Explorer en comparant : la plateforme SimEDB²⁴

Après un travail de paramétrage grossier, fondé sur de grandes variations des valeurs, 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 plus précise. Les variations entre simulations sont trop fines pour être distinguables les unes des autres par le biais

23. 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 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.

24. La plateforme d'exploration SimVADB (SimFeodal Visual Analysis Dashboard) a été renommée SIMEDB ([...] Exploration Dashboard) par soucis de simplicité, le terme « Exploration » nous semblant plus 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 plateforme d'exploration de données issues de simulation dans une « famille » d'outils d'exploration de données spatio-temporelles.

d'une comparaison avec un référentiel unique²⁵. Cela s'entend quelle que 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 3).

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 quelques exemples de cas de figures :

- La comparaison entre une expérience spécifique et une autre expérience spécifique de même « importance », par exemple en comparant deux expériences qui font varier légèrement différemment une valeur de paramètre.
- La comparaison entre une expérience spécifique et une autre expérience spécifique d'« importance » différente, par exemple une version « de base » que l'on compare à l'une de ses variantes.
- La 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.

Il s'agit en réalité de faire varier la notion de « simulation de référence », qui peut alors revêtir plusieurs formes. Pour cela, il n'est plus possible de mener 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. Cela implique 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. D'un point de vue méthodologique, cela requiert aussi de pouvoir afficher conjointement les indicateurs de sorties de deux expériences (ou ensembles d'expériences). 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 plateforme d'exploration (voir figure 4.9), renommée SIMEDB (**S**im**F**eodal **E**xploration **D**ash**B**oard), l'accent est donc mis sur la comparaison de deux ensembles de résultats, chacun répondant à une sélection propre. L'utilisateur peut ainsi « paramétriser » interactivement, via *brushing*, les expériences à afficher pour le référentiel et pour la comparaison. On dispose pour cela de deux outils de filtrage des simulations, qui peuvent être utilisés de concert ou par étapes successives²⁶ (partie de gauche dans la figure 4.9).

25. Dans 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 sortie 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, du fait de 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%.

26. En menant par exemple une première comparaison entre une expérience « A » en haut et « B » en

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 4.9). 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.

Nous reviendrons plus précisément et longuement sur la description de SIMEDB dans les parties suivantes (section 4.4, p. 237), mais après en avoir décrit les étapes de construction et les besoins auxquelles ces évolutions répondaient, nous proposons maintenant de revenir sur les données manipulées par cette plateforme d'exploration. Le type, la structure et la masse de ces données (section 4.1) sont en effet indissociables des choix méthodologiques effectués pour SIMEDB. Il est donc nécessaire de présenter les choix et contraintes de ces données avant d'entrer dans une description approfondie de la plateforme.

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.

CHAPITRE 4. EXPLORER VISUELLEMENT DES DONNÉES DE SIMULATION MASSIVES POUR ANALYSER LE COMPORTEMENT D'UN MODÈLE.



FIGURE 4.9 – La comparaison d'expériences dans SimEDB

4.3 Organiser les données

On a vu dans la première partie de ce chapitre (section 4.1) que les données produites par SIMFEODAL étaient nombreuses, diverses et massives. La seconde partie (section 4.2) 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 un 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, cette méthode conditionne et constraint fortement aussi bien les modalités de création des indicateurs que les possibilités de la plateforme d'exploration de les afficher de manière interactive.

4.3.1 Assurer la capacité d'interrogation des données

Avant de se soucier du « schéma » de la base de données²⁷, 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 que l'on peut alors comparer de manière approfondie.

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 4.2.4). 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 contraire, dans un outil dynamique et interactif, les indicateurs sont calculés depuis les données « à la volée », c'est-à-dire à chaque fois 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 sélection est extrêmement important, cette solution n'est

27. 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.

plus possible. Il est donc 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 définis. Ces critères, dont l'énonciation guidera cette partie, sont (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.

4.3.1.1 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 mises à disposition d'une plateforme. 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 posséderait 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 accéderaient 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 à chaque fois distribuer à nouveau l'ensemble du jeu de données.

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 plateforme d'exploration de travailler à chaque fois sur les données issues des simulations 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 système²⁸. 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 plateformes. La spécificité présente l'avantage de langages plus adaptés aux données manipulées, et donc souvent plus intuitifs dans l'interrogation des particularités 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).

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 souvent classés selon les grands traits de la méthode dont ils organisent les données. Les deux principaux « grands-types »²⁹ sont les SGBD « relationnels » et les SGBD « NoSQL ». Si la distinc-

28. 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 plateformes, et demandent donc un langage et un formalisme de requête spécifique.

29. Il en existe d'autres, comme les SGBD orientés objets (quasiment disparus aujourd'hui), orientés graphes (Neo4j, etc.), les SGBD pensés pour le stockage et l'interrogation d'ontologies (*Triplestores RDF*,

tion est sujette à de très nombreux débats, souvent virulents³⁰, on se contentera ici de définir les SGBD relationnels, qui sont par ailleurs les plus fréquemment utilisés, comme des SGBD 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 (par exemple, une même colonne ne peut donc contenir conjointement un nombre et un texte dans des lignes différentes). On nomme ces SGBD « relationnels » parce qu'ils permettent de mettre en relation des tables différentes, c'est-à-dire des contenus hétérogènes, par le biais de champs identiques. On peut ainsi faire communiquer différentes tables possédant une colonne identique par le biais d'une jointure, qui permet de mettre en commun les informations de ces tables dans une unique table résultante.

À l'inverse, les SGBD NoSQL se définissent de manière opposée à ce mode de stockage³¹, 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 généralité : alors que les SGBD relationnels partagent un langage d'interrogation commun, le SQL (*Structured Query Language*)³², 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. 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.

interrogeables en langage SPARQL) ou encore les nouveaux SGBD de type « NewSQL » (Apache Ignite, CockRoachDB, etc.) 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.

30. À l'instar des violentes querelles qui agitent régulièrement les informaticiens : Vim vs Emacs, Programmation Orientée-Objet vs Programmation Fonctionnelle, R vs Python...

31. À l'origine, c'était le sens fort du nom « NoSQL » : Non SQL, le SQL faisant ici référence au langage classiquement utilisé dans les 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 même que de nombreux SGBD NoSQL, qui traduisent désormais cet acronyme par « Not only SQL », sont maintenant relationnels, mais mettent également en avant d'autres types d'approches.

32. 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 ...`)

En raison de la générericité de ces solutions relationnelles, qui vient s'ancrer dans la recherche de reproductibilité et de générericité 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 adaptée que, au cours de la construction et de l'évolution de SIMEDB, le SGBD choisi pour héberger les données a changé plusieurs fois. La générericité des outils choisis a permis de minimiser, voire quasiment d'éviter, la réécriture du 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 comme intermédiaire entre les SGBD mobilisés et les applications qui les interrogent. Les entrepôts de données jouent aussi bien le rôle d'agrégateur de données³³ que d'environnement 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 générérique, souvent performante grâce à des optimisations spécifiques (pré-calcul des requêtes possibles par exemple).

Environnements OLAP. Dans le domaine de la visualisation interactive de données, les *data warehouses* 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 multidimensionnelles spatiales et temporelles. Dans ce cadre, où ces outils sont appelés « SOLAP » (*Spatial OLAP*), les données spatiales s'intègrent extrêmement bien en raison

33. C'est-à-dire qu'ils permettent d'agrégner 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).

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, TCHOOUNIKINE et MIQUEL 2005 ; ZAAMOUNE et al. 2013), et sont couramment employées pour répondre à des questionnements méthodologiques proches de ceux développés dans notre travail. 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 générativité. 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 générativité 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 à la base de données, recevoir la requête et renvoyer les données correspondantes. De plus, toujours dans l'optique de conserver une universalité de la plateforme d'interrogation face à la solution de stockage choisie, on ne conservera que les SGBD acceptant les connexion standardisées, de type 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 en fait un filtre important : sur la centaine de solutions disponibles, seule une poignée est en mesure de stocker efficacement et d'interroger de l'information spatiale³⁴.

Pourtant, une grande majorité des indicateurs de simulation de SIMFEODAL est non spatiale, en raison de la difficulté à agréger des données spatiales théoriques. Ainsi,

34. 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 ce calcul est aisément réalisable avec un stockage géométrique.

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 géographique³⁵.

La gestion de données spatiales n'est donc pas une priorité dans nos facteurs de choix de SGBD, contrairement aux points évoqués auparavant. Elle peut toutefois se révéler avantageuse, ne serait-ce que pour permettre l'observation des configurations spatiales simulées. Cet usage de la dimension spatiale relève alors d'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 la capacité de gérer les données spatiales.

Pour héberger et organiser les données produites par SIMFEODAL, en vue de leur interrogation dans SIMEDB, nous avons donc 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, p. 216), au sein de Systèmes de Gestion de Base de Données (SGBD). Ces SGBD permettent une interrogation standardisée (Interrogation spécifique ou générique, p. 217) via un langage de requête universel, le SQL (Bases de données relationnelles ou NoSQL, p. 217). On a ensuite décidé d'interroger ces SGBD sans passer par l'intermédiaire d'entreposés de données, et au travers de connexion aussi standardisées que possible (Entrepôts de données et interrogation directe, p. 219). Les SGBD répondant à ces critères sont les SGBD relationnels, dont certains possèdent qui plus est la capacité de stocker et d'interroger des données spatiales (SGBD et données spatiales, p. 220), ce qui constitue notre dernier filtre.

4.3.1.2 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 portent sur une différenciation des SGBD relationnels existants. Ces deux critères 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.

35. Les raisons en sont multiples et on y reviendra largement dans le chapitre 6. 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.

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 session (*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 standard³⁶, 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 informatique dont sont intégrées les données, certaines requêtes identiques peuvent renvoyer des résultats différents d'un SGBD à l'autre. Plus gênant, les normes implémentées peuvent varier d'une version à l'autre d'un SGBD.

36. 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 version du SQL qu'elles respectent.

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, du fait de leur grand nombre d'utilisateur, la rétro-compatibilité des requêtes est garantie. 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 assurée.

Comme souvent en matière d'infrastructure informatique, il est donc nécessaire de tenir compte d'un compromis entre l'ancienneté et la forte utilisation 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'envergure³⁷. Ce faisant, on se coupe immanquablement de solutions intéressantes et performantes³⁸. Ce choix est 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. Nous nous attacherons 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 d'éliminer les SGBD

37. La liste des solutions envisagées, ensuite comparées à l'aune de leurs performances, est visible dans l'axe des ordonnées de la figure 4.10.

38. 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 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 incertaine la continuité de son développement dans le temps.

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. 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, nous avons comparé 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. Les résultats de la comparaison de la vitesse d'exécution des SGBD candidats sont présentés sur la figure 4.10³⁹. La première colonne du graphique montre ainsi le temps nécessaire à l'insertion du jeu de données exemple 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.

Globalement, on lit sur la figure des résultats qui semblent 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. 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, en revanche, 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 mineur 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 4.2.5). 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 –, 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 « join-

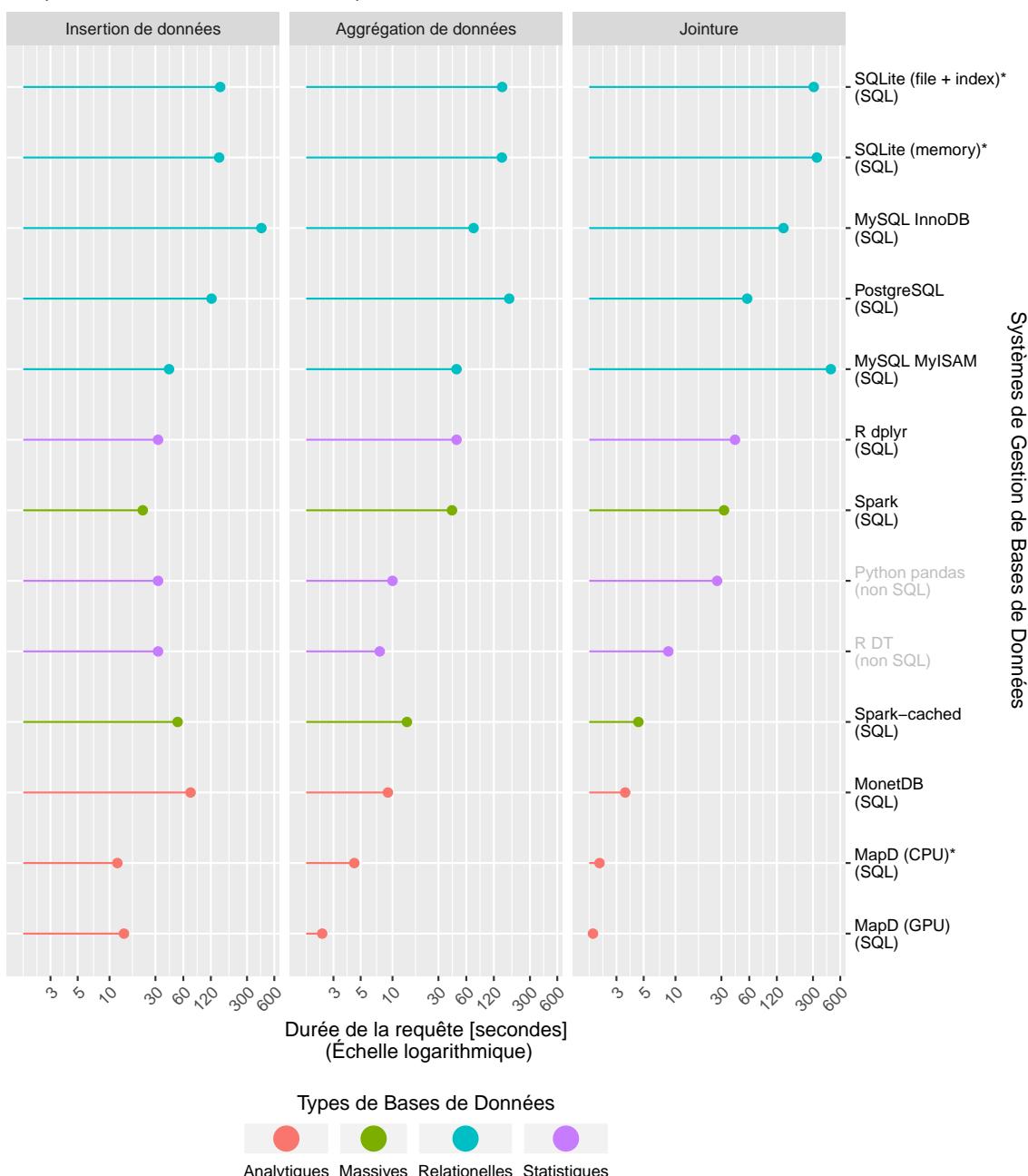
39. Dans cette figure, on compare la rapidité de différentes requêtes sur un jeu de données identique selon les SGBD. Ce type de test de performance permettant la comparaison de solutions techniques diverses est appelé *benchmark*. Ce jeu de données, composé de 100 Millions de lignes et de deux colonnes numériques, présente une volumétrie comparable (largement inférieure en nombre de colonnes toutefois) à celle des données issues de SIMFEODAL qui sont interrogées dans SIMEDB. Les premiers *benchmarks* ont été réalisés par PAFKA (2017), et complétés, en exécutant les mêmes requêtes que l'auteur sur d'autres SGBD, sur un matériel moins performant que celui utilisé initialement.

ture »), cela implique que chaque indicateur requiert au moins une minute avant de s'afficher. La figure 4.10 montre les fortes différences qui existent de ce point de vue entre les SGBD étudiés. On peut y constater que l'écart est très important, par exemple, concernant le temps nécessaire à une jointure, on peut y constater que MonetDB requiert 4 secondes quand SQLite en demande 300 (5 minutes). Pour observer une dizaine indicateurs, l'utilisateur devra donc attendre une dizaine de minutes, avant même de pouvoir commencer à les analyser visuellement

Pour noircir le trait, notons de plus que les résultats communiqués dans la figure 4.10 correspondent à des requêtes simples qui ont valeur d'exemples basiques. 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 en fait bien inférieures aux durées éprouvées en conditions réelles au sein de SIMEDB.

CHAPITRE 4. EXPLORER VISUELLEMENT DES DONNÉES DE SIMULATION MASSIVES POUR ANALYSER LE COMPORTEMENT D'UN MODÈLE.

Performances comparées de SGBD
Temps nécessaires à l'exécution de requêtes



* MapD (CPU) et SQLite : Benchmark mené sur un système moins puissant que les autres

FIGURE 4.10 – Comparaison de la performance de différents SGBD sur un jeu de données test de 100 millions de lignes. Résultats complétés depuis les benchmarks de PAFKA (2017). Les « types de Bases de Données » correspondent aux usages les plus fréquents des SGBD relationnels comparés :

- **Relationnels** : solutions SGBD relationnelles les plus anciennes et classiques. Notons que tous les SGBD testés sont relationnels, mais que les autres catégories sont plus spécialisées.
- **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 4.10 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.

Cependant, un autre domaine d'étude appuie l'importance relative des écarts, même 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 plateforme.

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 4.11, 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.

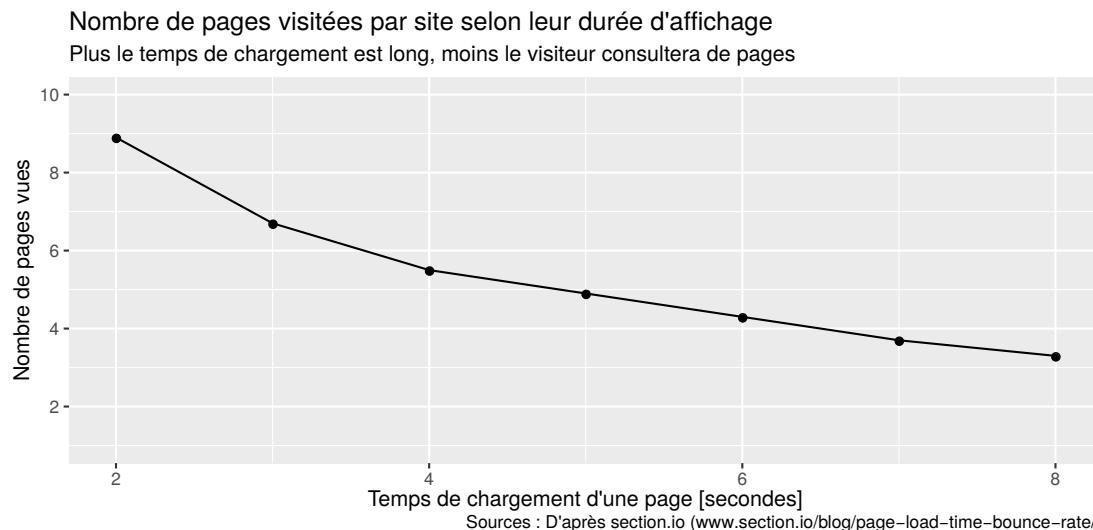


FIGURE 4.11 – Impact du temps de chargement d'un site web sur sa consultation. D'après ELLIOTT (2017).

Cet exemple est plus directement comparables aux contraintes de SIMEDB. Chaque consultation d'un indicateur de sortie peut être rapportée 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 plus 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 plateforme présente pour lui un intérêt professionnel, le thématicien sera bien plus patient que face à un quelconque site web. 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 une infrastructure informatique qui n'est pas optimisée pour cette solution⁴⁰, 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. 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, KOHLHAMMER et al. 2010). Toutefois, les données issues de SIMFEODAL sont amenées à augmenter, renforçant donc petit à petit l'écart de performance entre MapD et MonetDB. De plus, dans les faits, nous avons utilisé MonetDBLite pendant une large partie de la conception de SIMEDB, mais ce SGBD s'est montré à plusieurs reprises 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. Au terme de notre réflexion sur nos besoins et de notre étude comparative des différents SGBD envisageables, nous avons donc choisi d'utiliser le SGBD relationnel MapD⁴¹ – depuis renommé OmniSci⁴² – pour stocker les données issues de SIMFEODAL.

4.3.2 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 part⁴³, et un ensemble de problématiques d'autres part⁴⁴. Ce MCD décrit donc les tables, leur composition (attributs) et les liens entre tables qui permettent de mener des interrogations croisées. Par exemple, on 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.

40. MapD est 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.

41. 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.

42. www.omnisci.com

43. 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.

44. 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.

Les choix de conception d'un MCD sont fortement liés aux types de SGBD dans lesquelles ils doivent être implémentés. L'implémentation d'un MCD très relationnel dans un SGBD pensé collection (NoSQL par exemple) demande par exemple une certaine gymnastique intellectuelle et une bonne habitude de la modélisation de bases de données pour mettre en correspondance ces schémas intrinsèquement différents. À l'inverse, le stockage d'informations très hétérogènes sur un ensemble d'individus sera complexe à implémenter au sein d'un SGBD relationnel ou objet. 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 donc 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 généralement 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 compléition des informations enregistrées. Pour pouvoir analyser une expérience, il faudra supprimer ces données incomplètes afin qu'elles n'influencent pas l'étude des simulations complétées et, elles, 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 des 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 entre temps, en raison d'une mise à jour qui a échoué 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 adaptée à un traitement. Les attributs de chacun des types d'agent sont enregistrés dans des fichiers spécifiques. Ces fichiers demeurent fondamentalement isolés les uns des autres, qu'ils aient aient été nettoyés ou non. Or, 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 nécessaire de permettre – et de fluidifier – ces requêtes croisées. Le choix d'un SGBD relationnel nous

permet de concevoir et d'implémenter de manière explicite et formalisée ces relations entre les différentes tables individuelles qui proviennent des sorties brutes d'un modèle.

4.3.2.1 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). Ces modèles logiques 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 sont 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. Nous savions ainsi qu'une majorité d'indicateurs demanderait des requêtes correspondant à 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 (figure 4.12), puisque celui-ci se montre extrêmement efficace pour réduire les besoins en jointures, qui sont par nature chronophages, et pour des tâches d'agrégation lourdes.

CHAPITRE 4. EXPLORER VISUELLEMENT DES DONNÉES DE SIMULATION MASSIVES POUR ANALYSER LE COMPORTEMENT D'UN MODÈLE.

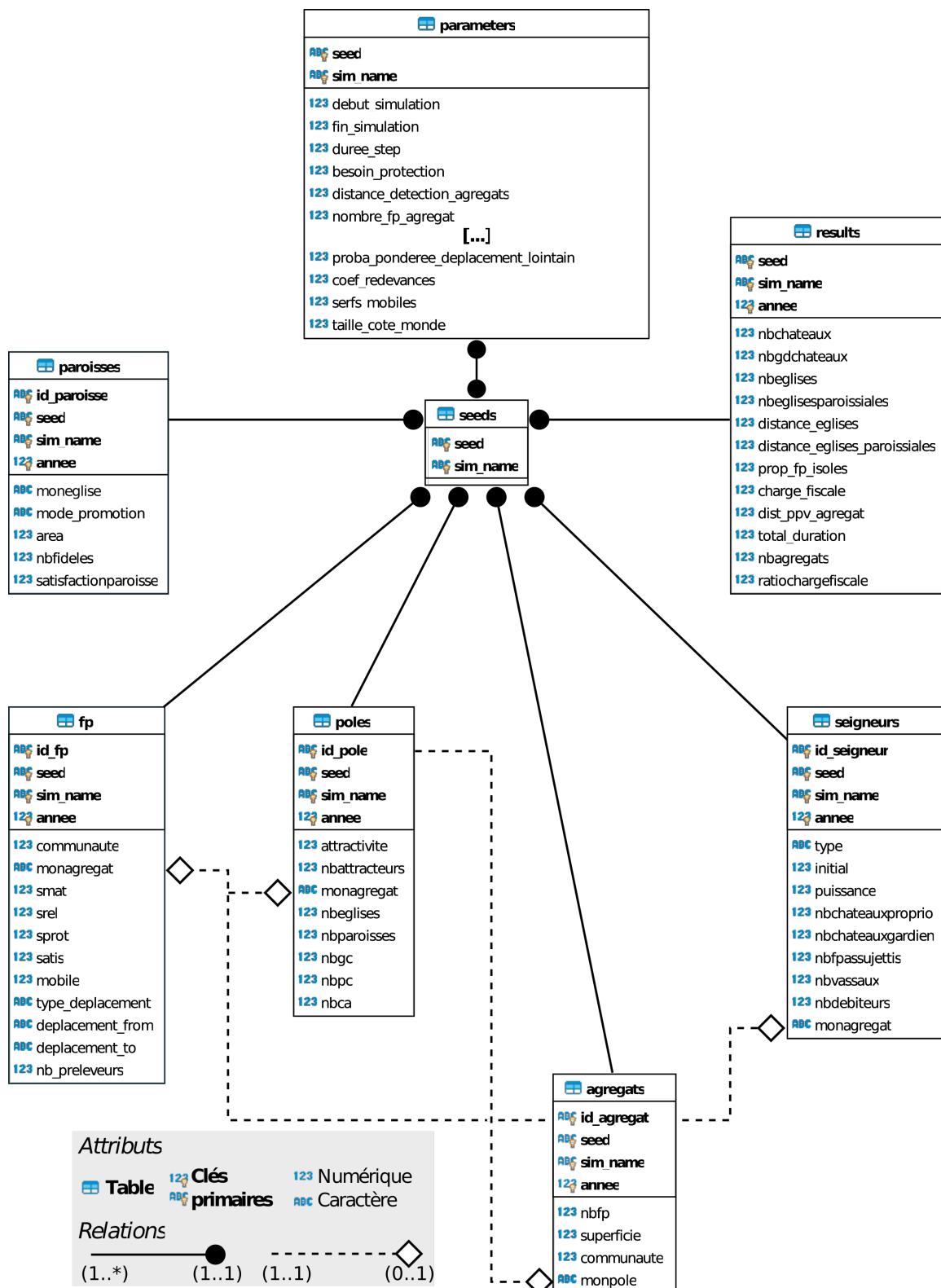


FIGURE 4.12 – Modèle Conceptuel de Données (MCD) des données en sortie de simulation de SIMFEODAL telles qu'implémentées dans SIMEDB.

Dans cette représentation, nous employons une simplification du formalisme UML, pensé ici autour des tables plutôt que de leur représentations sous forme de classes/objets. Les cardinalités sont figurées de manière uniquement graphique, et nous ne représentons que les relations codées directement dans la base de données, et non les jointures possibles.

Exemple de lecture : chaque agrégat est caractérisé par une graine aléatoire (seed) et un nom de simulation (sim_name), qui permettent de retrouver l'expérience et la réplication dont il fait partie (table seeds), et donc de retrouver les paramètres propres de celle-ci (table parameters). Chaque agrégat est membre (ou non, relation 0..1) d'un pôle, et est constitué de foyers paysans qui peuvent appartenir à un seul agrégat (ou à aucun, relation 0..1).

Au centre de cette étoile, nous avons disposé une table simple, contenant les informations sur lesquelles une majorité des agrégations sont 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`)⁴⁵.

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 plus 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 (année). 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 là encore 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 interactif qui en est fait (voir l'encadré 4.2).

Notons tout de même que l'on s'éloigne légèrement du classique schéma en étoile en raison des relations que nous avons choisies d'insérer entre les tables des différents agents (relations figurées en pointillées dans la figure 4.12). 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. Ces relations permettent par exemple d'examiner la composition des pôles qui contiennent des agrégats (un agrégat est membre ou non d'un pôle, et un pôle ne peut contenir qu'un 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 utilisés que les indicateurs plus directs (section 3.2.3). Les requêtes correspondantes,

45. La graine aléatoire (`seed`) 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 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.

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.

4.3.2.2 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. De plus, le choix de s'écartier 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 (section 4.2.6), dans SIMEDB, on compare les simulations en les isolant à partir des valeurs de paramètres qui leur correspondent, via un acte de *brushing* 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 présentées dans l'encadré 4.2.

Encadré 4.2 : Un exemple d'interrogation de la base de données de SimEDB.

La figure 4.13 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 répercutée à travers le MCD de SIMFEODAL (figure 4.12). La démarche aboutit à 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.

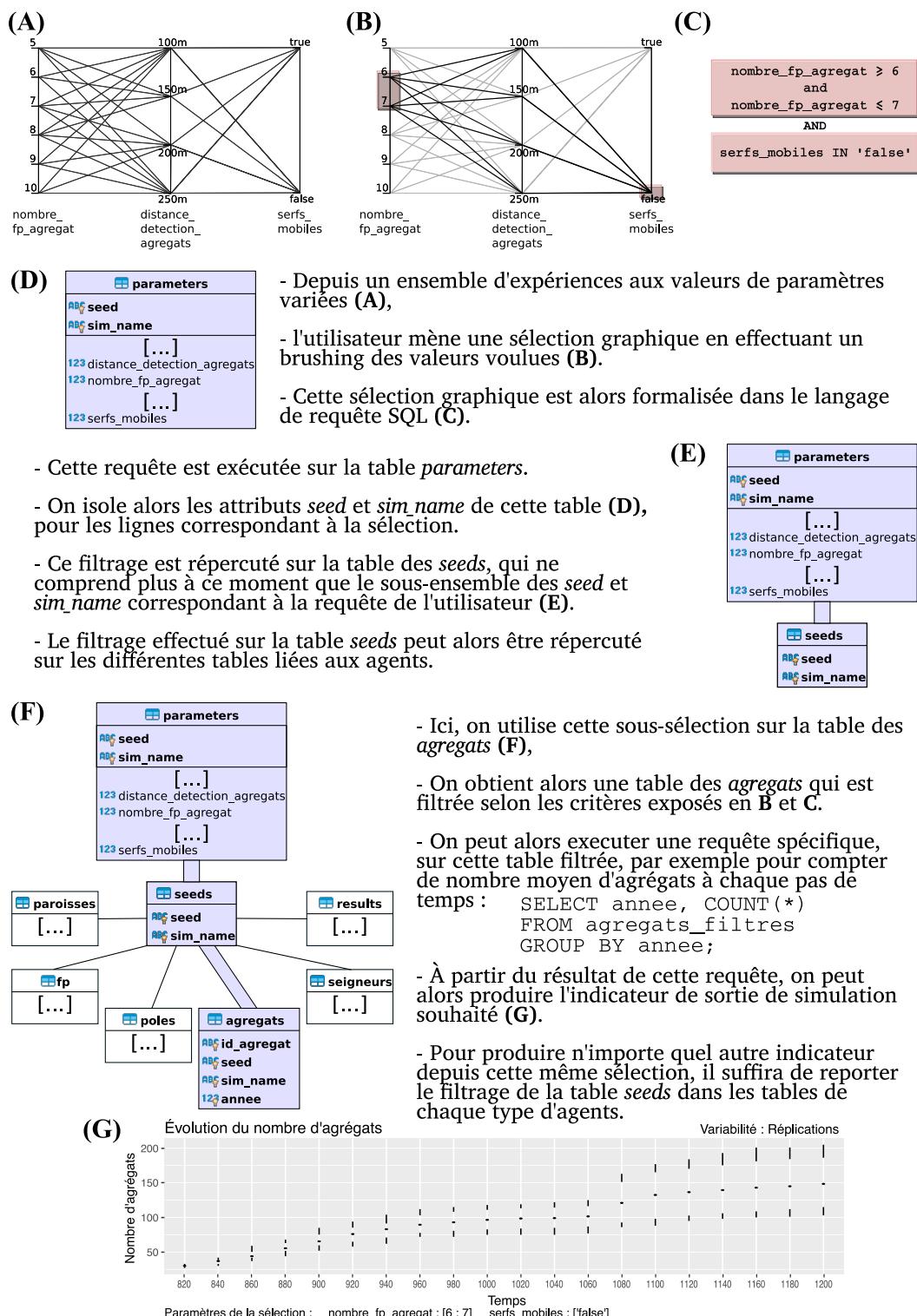


FIGURE 4.13 – De la sélection interactive à l'indicateur de sortie.

Une organisation dédiée à l'exploration interactive

Comme nous venons de le présenter, nos choix d'organisation des données ont été fait dans une visée résolument applicative, c'est-à-dire que nous avons pensé l'organisation, la structuration et le SGBD d'implémentation pour les mettre au service de la plateforme d'exploration SIMEDB. Le SGBD choisi, MapD, est ainsi un logiciel particulièrement adapté aux besoins identifiés, c'est-à-dire aux besoins d'efficacité et de 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, suivant un 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, de la calibration, et plus généralement, de l'exploration 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.

4.4 Une plateforme d'exploration de données de simulations : SimEDB

La section 4.2 (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 plateforme permettant l'exploration et la comparaison interactive des sorties de simulation. La plateforme proposée en réponse à ce besoin, SIMEDB⁴⁶, dans un objectif de générativité 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.

4.4.1 Contraintes

4.4.1.1 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 4.14, emblématique, représente la conception de la géovisualisation par Alan MACEACHREN. Elle replace les types d'usage d'une plateforme 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*).

46. SimFeodal Exploration DashBoard, disponible à l'adresse <https://simedb.curia.info>.

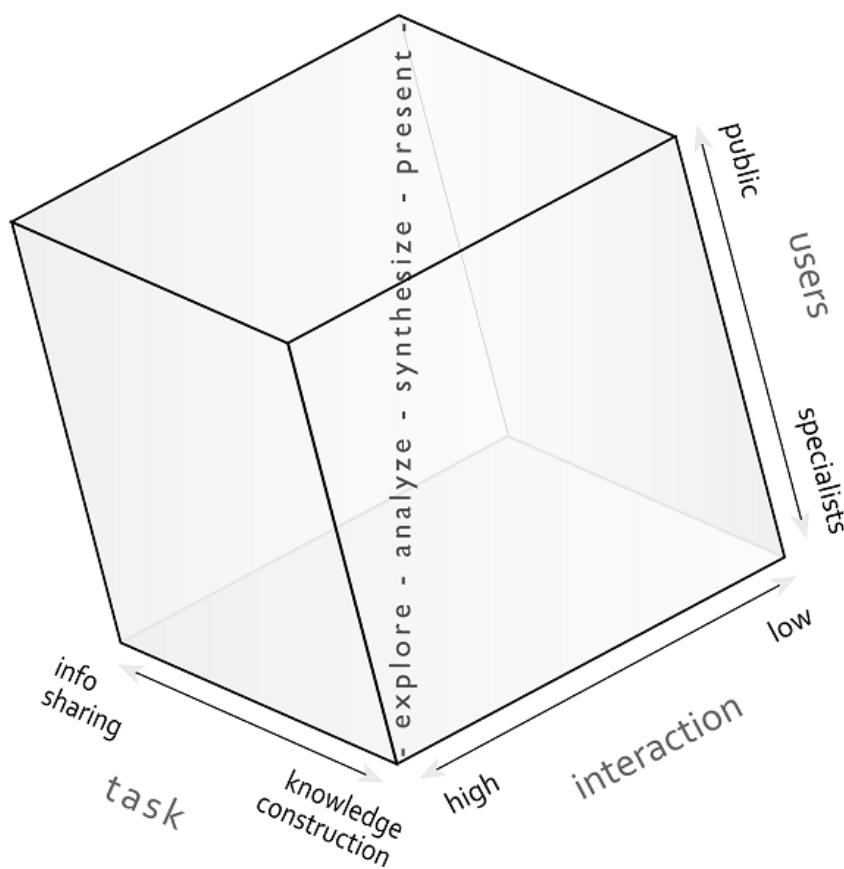


FIGURE 4.14 – «An update to Cartography3, 10 years after its conception», par ÇÖLTEKIN, JANETZKO et FABRIKANT (2018), d'après MACEACHREN et al. (2004, p. 10).

ROTH (2015, p. 16) commente cette figure en assimilant 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. À 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 4.14. Il ne s'agit ainsi pas d'explorer des données (*explore*), au sens de MacEachren, qui sous-entend la recherche d'informations dans un jeu de données inconnu de l'utilisateur. Le besoin identifié consiste dans notre cas à permettre aux utilisateurs d'explorer des sorties de simulation à travers des indicateurs déjà pensés et constitués. Il ne s'agit donc 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 dans la ligne-droite des usages (voir la figure 4.15).

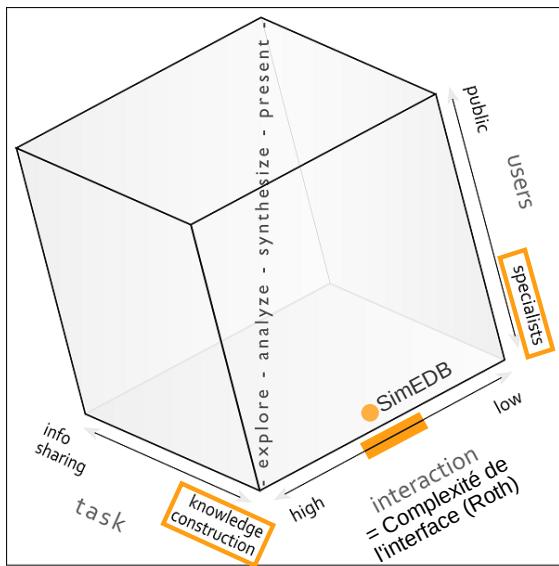


FIGURE 4.15 – Positionnement de SIMEDB dans le cube *Cartography³* de MAC EACHREN.

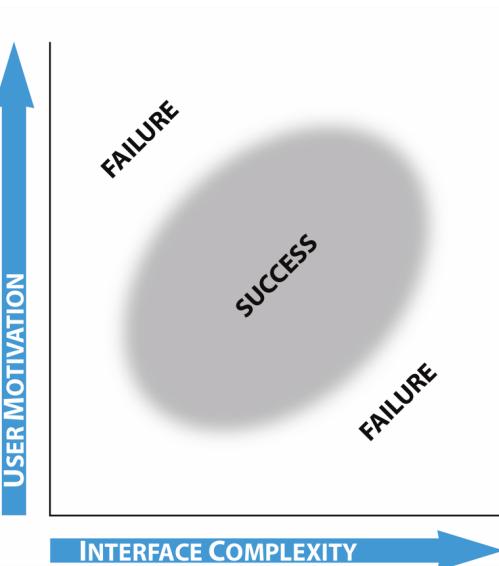


FIGURE 4.16 – « *Interface complexity versus user motivation.* », ROTH (2013, p. 79).

Cet écart au modèle conceptuel de MacEachren s’explique notamment par la diversité des utilisateurs de SIMEDB. Il serait inapproprié de qualifier un niveau d’expertise général des utilisateurs tant les spécificités de cette expertise sont nombreuses. Entre des profils de spécialistes thématiciens, de modélisateurs ou encore de géomaticiens, l’expertise est présente, mais concerne 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 plateforme 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 4.16).

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 plateforme 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 4.1.4). On peut dès lors se permettre de développer une interface plus complexe que si l’on visait un plus large public.

Intuitivité de l’usage au regard des applications traditionnelles. En dépit de ce premier constat, 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 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. Partant de ces constats, on souhaitait une plateforme aussi épurée et *ad hoc* que possible, plutôt que de partir sur la personnalisation et l'adaptation d'une solution existante qui aurait nécessairement été générique et donc difficile à spécialiser.

4.4.1.2 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, du point de vue de l'expérience utilisateur, ce besoin de rapidité par deux aspects complémentaires : la motivation et la concentration. 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 concentration⁴⁷ (*focus*).

Le premier point a été abordé plus haut (section 4.3.1.2), 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 » (ibid., p. 9).

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 que les utilisateurs

47. 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.

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 rapides⁴⁸.

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 néanmoins 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, FISHER 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 concentration⁴⁹.

« 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.

Dans notre cas, du fait du temps nécessaires de requête des données qui est (hors temps d'affichage et hors plateforme) déjà important, il nous sera impossible d'arriver aux délais de 100 ms ou 500 ms évoqués dans la littérature. Nous avons donc choisi de viser en temps de latence maximale de 10 secondes, qui correspond à des performances acceptables au regard des calculs des affichages à effectuer.

48. 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.

49. Les passages en gras sont présentés de cette manière dans le texte original qui est ici cité.

4.4.1.3 Interopérabilité et évolutivité

Une autre contrainte forte tient cette fois au choix de l'environnement informatique qui accueillera la plateforme 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 web⁵⁰. Ce choix a des nombreuses répercussions, aussi bien en matière de possibilité d'accès que de facilité à faire évoluer la plateforme.

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.

Différents supports d'interrogation. Si une application locale offre des performances plus intéressantes qu'une application distante, elle implique également une énorme contrainte : l'application doit être interopérable entre les différents systèmes d'exploitations (*Operating System*, OS) et les différentes versions de ceux-ci. Les utilisateurs potentiels de SIMEDB se partagent ainsi entre les trois systèmes d'exploitations majoritaires (Windows, MacOs, Linux)⁵¹. Pour permettre à chacun d'utiliser SIMEDB, il faudrait donc que le développement de cette plateforme soit compatible avec ces différents OS, ce qui est une contrainte considérable en développement logiciel.

En somme, disposer d'une application locale universelle, c'est-à-dire utilisable 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 plateforme d'exploration de données locale dédiée aux données de simulation de SIMFEODAL, nous aurions du 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 4.3.1.1), la question de l'application locale ou distante pose un contrainte supplémentaire en matière de maintenabilité et d'évolutivité de la plateforme choisie. Dans le cadre d'une application locale, la distribution des différentes mises à jour de l'application entraînent nécessairement une réinstallation locale, à chaque fois. Le risque est alors que tous les utilisateurs ne disposent pas de la même version, ce qui peut entraîner, par exemple, des contradictions

50. Cette question était également posé pour le choix du SGBD en section 4.3.1.1. 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.

51. À ce titre, ils sont une bonne représentation des acteurs de la recherche

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 plateforme 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, et interprètent de la même manière une page web, indépendamment de leur support de consultation. Une plateforme distante disponible à partir d'un navigateur internet à en outre l'avantage de pouvoir être utilisée sur des OS mobiles (tablettes, *smartphones*, etc.), permettant notamment des usages tactiles – des fonctionnalités qu'il aurait là aussi fallut développer spécifiquement dans le cadre d'une solution locale. De plus, comme pour les SGBD, l'usage d'une plateforme 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 qui nous serait nécessaire peut être suffisamment court (quelques dizaines de minutes) pour que cela soit possible au cours d'une seule session de travail de l'utilisateur distant.

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 capacités 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 de se dégager de ce « goulot d'étranglement » technique qu'aurait sinon éprouvé la plateforme.

52. En nous appuyant dans un premier temps sur un serveur de calcul interne à l'UMR Géographicités, puis sur un serveur de calcul partagé mis à disposition par la « Très Grande Infrastructure de Recherche » Huma-Num ensuite.

4.4.1.4 Généricité de l'interrogation et indépendance vis-à-vis des données

La dernière contrainte, plus technique, tient au besoin de généricité d'une plateforme 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 4.3.1), 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 plateforme 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 plateforme à être indépendante de la source des données : quelque soit le SGBD choisi, les requêtes émises par la plateforme 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 4.2), 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 actuel, les données de sorties de simulation ont ainsi été tour à tour interrogées depuis de simples fichiers CSV jusqu'au SGBD ultra-performant MapD, en passant par des solutions intermédiaires plus classiques (SQLite et MonetDB notamment).

Il n'était donc pas 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.

Indépendance vis-à-vis des requêtes et modularité de l'implémentation. Pour garantir cette généricité, il est donc nécessaire de s'assurer que le mode de communication de la plateforme 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 une implémentation qui permette une factorisation des commandes (voir encadré 2.2) 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, etc.) au cours du temps. En SQL, pour spécifier une requête permettant par exemple 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 génér

rique, c'est-à-dire indépendante du type d'agent qui en deviendrait un argument, il est néanmoins 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. Ainsi, la déclaration d'une variable, par exemple pour paramétriser le nom de la table contenant les agents, est très différente dans les deux SGBD les plus utilisés (MySQL et PostgreSQL).

Nous avons donc plutôt choisi de faire appel à un langage intermédiaire, générant du SQL en sortie depuis une entrée sous forme d'un « *Domain Specific Language* » (DSL), ce qui nous permet 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 en modularités d'implémentation, ce qui permet d'utiliser des fonctions plus génériques adaptables à différentes données en entrée. Ainsi, le code-source développé est plus robuste, réutilisable, et évolutif.

Conclusion : Vers une plateforme 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 plateforme implémentée sous forme d'application web, utilisable depuis un simple navigateur – donc inter-opérable entre les différents supports technologiques –, ce qui exclut de fait quantités d'outils, de logiciels et de bibliothèques logicielles pensées pour l'exploration interactive de données.

On souhaite de plus que la plateforme 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 des bibliothèques logicielles de visualisations interactives intégrées.

L'utilisation de la plateforme doit être aussi efficace que possible, avec un temps de latence minimal entre la sélection interactive et l'affichage des indicateurs qui en résultent. 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 brosser 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 effectués pour les dépasser, que nous allons maintenant expliciter.

4.4.2 Construire une plateforme 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 liés. 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 plateforme 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. Comme nous l'avons expliqué, du fait de la facilité de la mise à jour d'une relation distante, cela ne pose toutefois aucun problème vis-à-vis de l'utilisation de la plateforme, largement indépendante, en matière de temporalités, du présent ouvrage.

4.4.2.1 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 chapitre 6, section 6.1.1).

53. Le code source de SIMEDB et l'historique de son versionnement sont, pour cela, disponibles et consultables en ligne sous licence libre, sur la plateforme 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.

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). 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. Pour construire des applications interactives en lignes, 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, 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 base de-

55. Applications en Flash, *applets* Java, etc.

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/>

mandent 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 aboutit donc nécessairement à 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 et ce sont majoritairement des logiciels propriétaires, donc non modifiables.

Entre ces deux extrêmes, quelques *frameworks* intermédiaires, qui proviennent plus souvent du monde de la manipulation de données que de celui 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 personnalisable et adaptable.

Généralement, chaque *framework* est associé à un langage de programmation (voir tableau 4.2) : 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)	+((2014))	↔ (2016)	+ (2017) (D3 : 2011)
Communauté	++	↔	+	-	+
Connaissance personnelle	++	-	↔	-	- -

TABLEAU 4.2 – Une sélection de différents *frameworks* dédiés à la création d'interfaces d'exploration de données.

Le choix du *framework* dépend certes de la maturité (pour assurer une certaine robustesse) de chaque projet – Shiny est à ce titre très en avance –, mais surtout du langage informatique que le concepteur de l'application souhaite utiliser et maîtrise. Dans le cas de SIMEDB, nous sommes adepte du langage R (voir COMMENGES et al. 2014) et pratiquons 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* dans le cas de 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. 244) 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 logiciel dénommé tidyverse (WICKHAM 2017), et permet 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 tabulaire⁵⁸, on obtient un ensemble d'instructions qui forment une « phrase » de manipulation de données, construite selon une « 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 4.17), c'est-à-dire qu'une suite d'instructions exprimées via `dplyr` en R (figure 4.17a) peut être traduite en SQL (figure 4.17b), 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.

58. Les fonctions de base sont 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 4.17a en donne un exemple commenté et concret.

CHAPITRE 4. EXPLORER VISUELLEMENT DES DONNÉES DE SIMULATION MASSIVES POUR ANALYSER LE COMPORTEMENT D'UN MODÈLE.

```
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 4.17 – 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 4.18, étape 1). On peut alors passer à l'étape de construction graphique des indicateurs. Il existe pour cela, dans le cadre de l'environnement (et du langage) R, de nombreux packages dédiés.

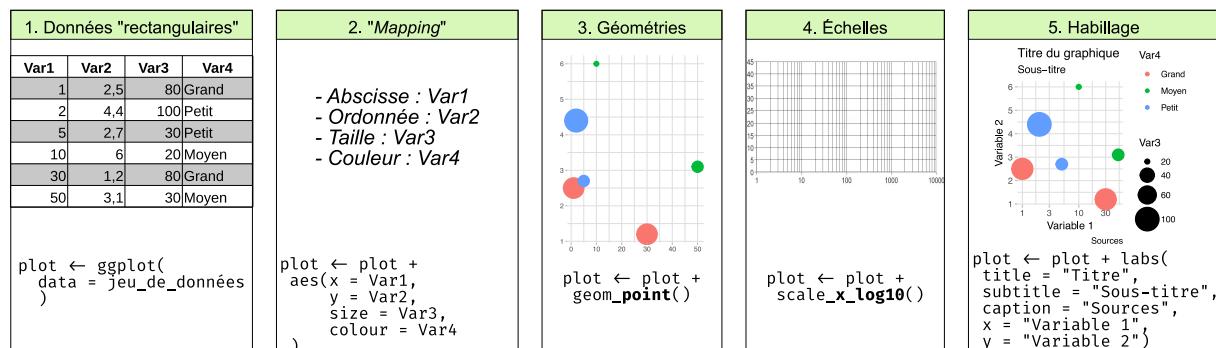


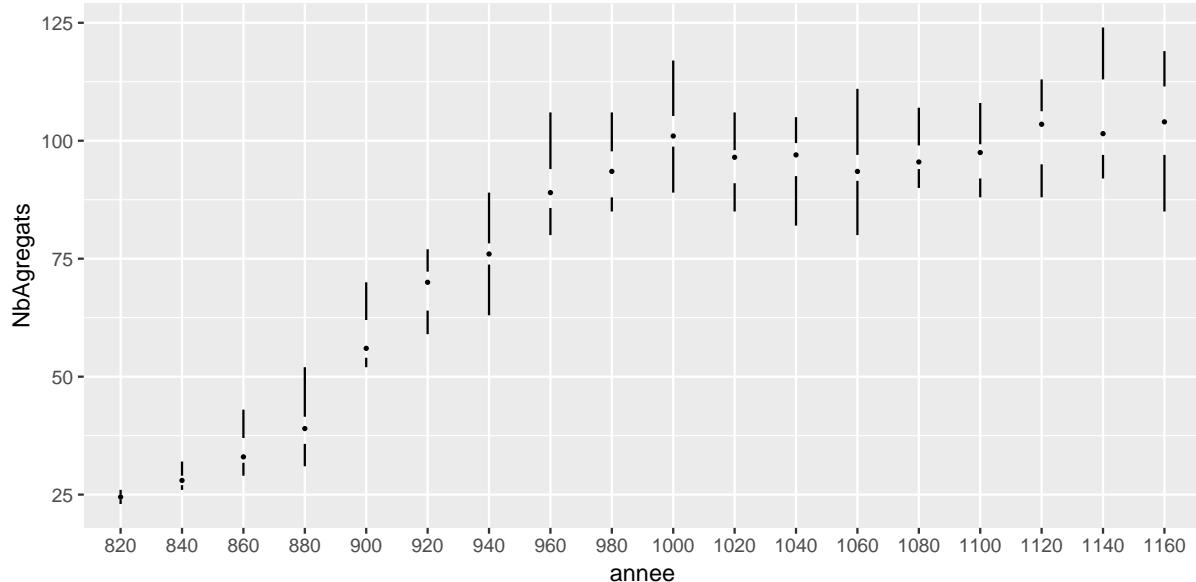
FIGURE 4.18 – Représentation des éléments de grammaire de ggplot2, d'après une idée de HEALY (2018).

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 Wilkinson (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, etc.), formant ainsi une mise en correspondance (*mapping*) des données avec les composants graphiques (voir figure 4.18, 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, pour les nombreux indicateurs de sortie de SIMFEODAL qui décrivent l'évolution du nombre d'agents au cours des années de simulation (les agrégats dans la figure 4.19), ce type de graphique est, d'une part, rapide à produire avec ggplot2 parce qu'il ne requiert que quelques lignes de codes. D'autre part, en changeant le tableau de données en entrée (créé dans figure 4.17a), on reproduit exactement le même type de graphique pour tous les types d'agents voulus (le nombre de foyers paysans, d'églises, etc.). Le package ggplot2 répond ainsi 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 minimaliste (Tufte boxplot)
```

(A) Code source R avec le package ggplot2



(B) Graphique généré

FIGURE 4.19 – 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 4.20). 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).

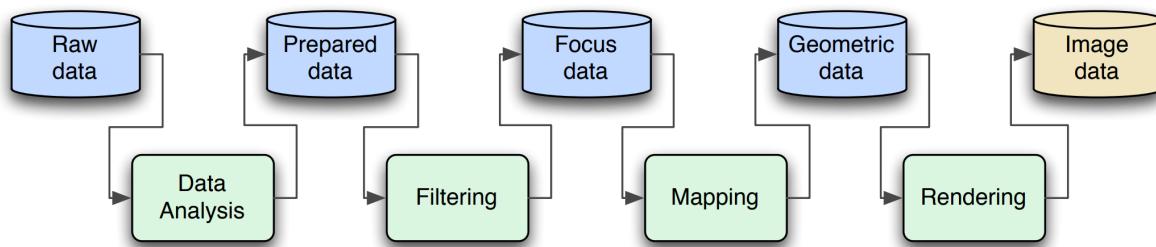
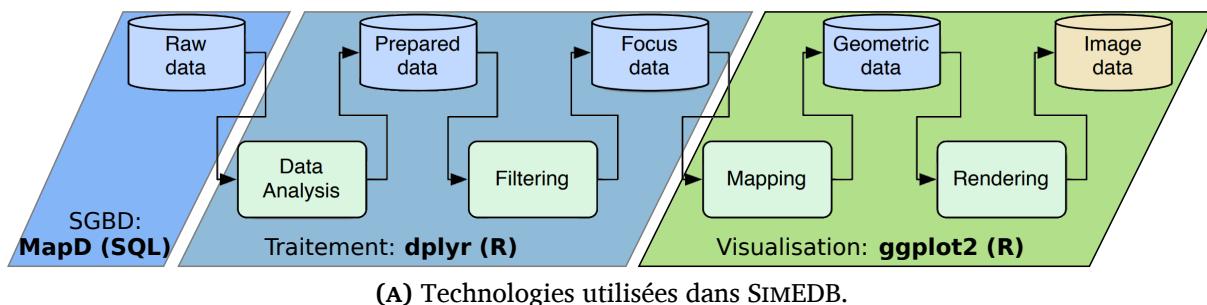


FIGURE 4.20 – « The Visualisation Pipeline », de KEIM, KOHLHAMMER et al. (2010, p. 92), d'après DOS SANTOS et BRODLIE (2004, p. 314)

Ce *pipeline* débute par des données brutes (*raw data*) auxquelles ont fait subir 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 ci-dessus), 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 dédié 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*.

Les packages utilisés pour construire les chaînes de traitements de données dans SIMEDB sont présentés dans la figure 4.21a, et le code-source, correspondant à l'exemple développé dans cette sous-partie, dans la figure 4.21.



(A) Technologies utilisées dans SIMEDB.

```
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 4.21 – Le « pipeline » de visualisation et son implémentation dans SIMEDB.
Cette implémentation est obtenue en assemblant les codes des figures 4.17a et 4.19a.

Modulariser les fonctions. Le *package* 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 tels modules⁵⁹, 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 4.22), ainsi, les indicateurs graphiques sont toujours représentés de la même manière dans des graphiques à droite (encadrés oranges), qui sont accompagnés d'outils de téléchargement (vectoriel et image) et de notation de l'indicateur (les étoiles) placés à leur droite.

En termes de code-source, la manière de produire les deux indicateurs comparés dans la figure 4.22 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. La modularité permet donc d'une part de minimiser la taille du code, mais surtout, avec la généréricité qu'elle apporte, de faciliter de manière considérable l'ajout ou la modification d'indicateurs.

59. <https://shiny.rstudio.com/articles/modules.html>

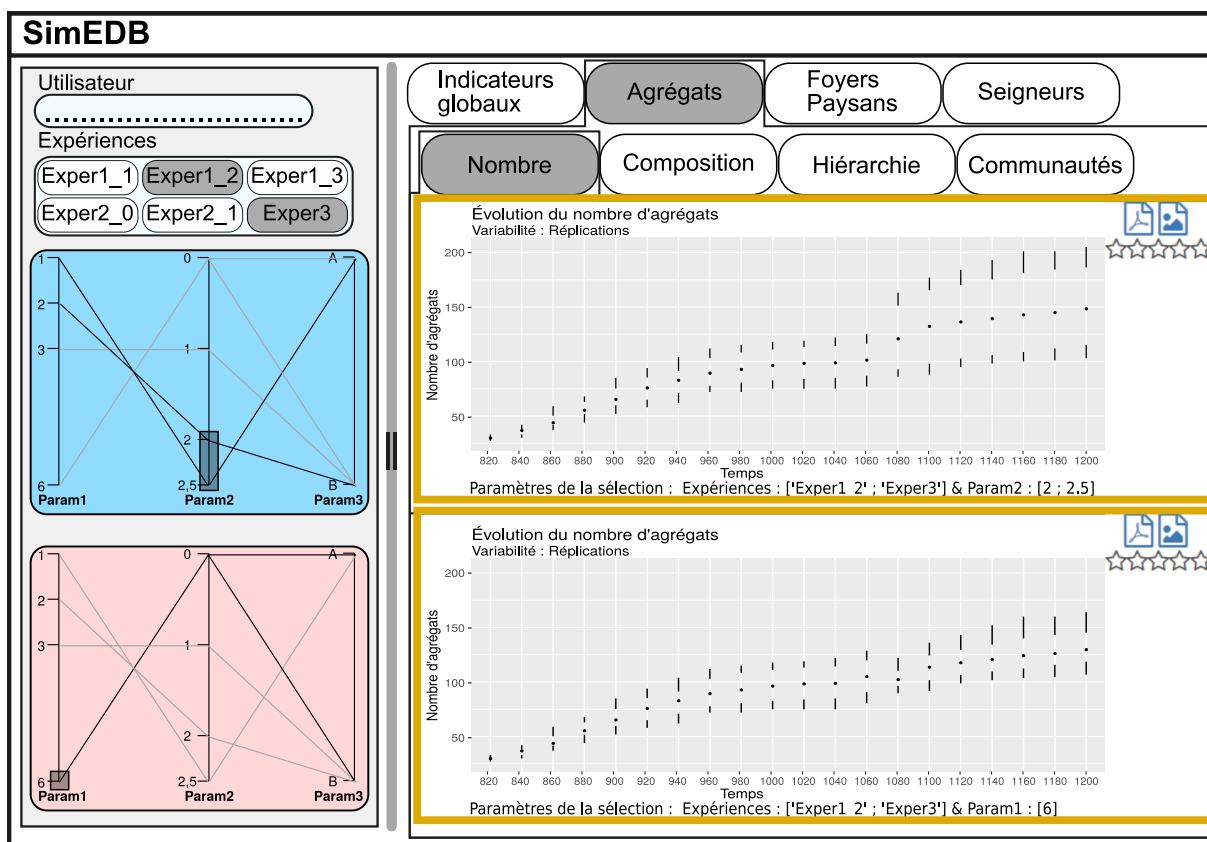


FIGURE 4.22 – Une conception modulaire.

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 et dans la partie inférieure 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 mock-up plutôt que de captures d'écrans, pour en simplifier la compréhension.

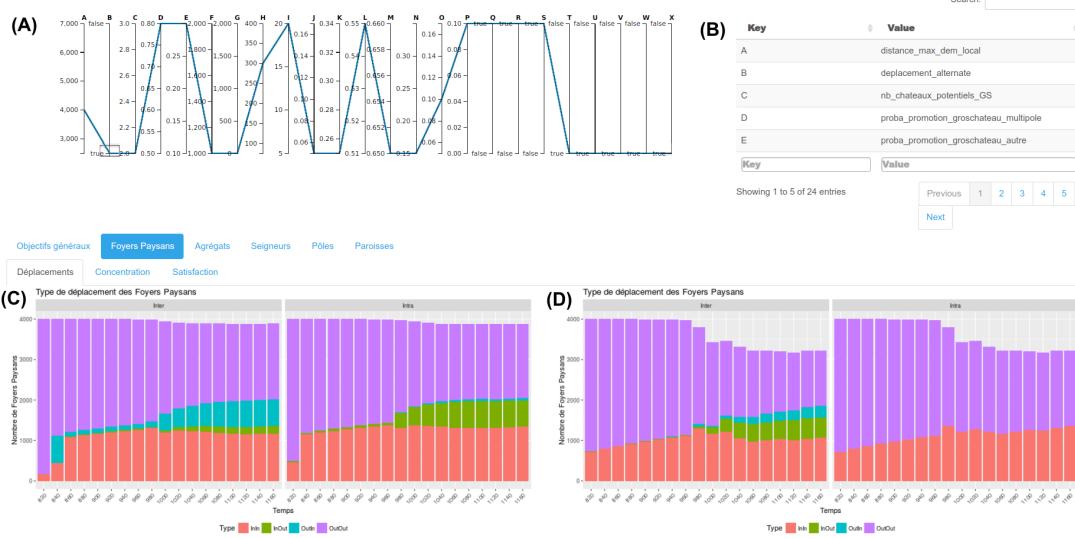
4.4.2.2 Choix de l'organisation visuelle

Les différentes étapes de construction d'une plateforme d'exploration (section 4.2 : 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, c'est-à-dire d'interface graphique. Par conséquent, depuis la première plateforme aboutie – SimVADB (figure 4.8, reprise ici en figure 4.23a) –, l'interface graphique a fortement évolué (figure 4.23b).

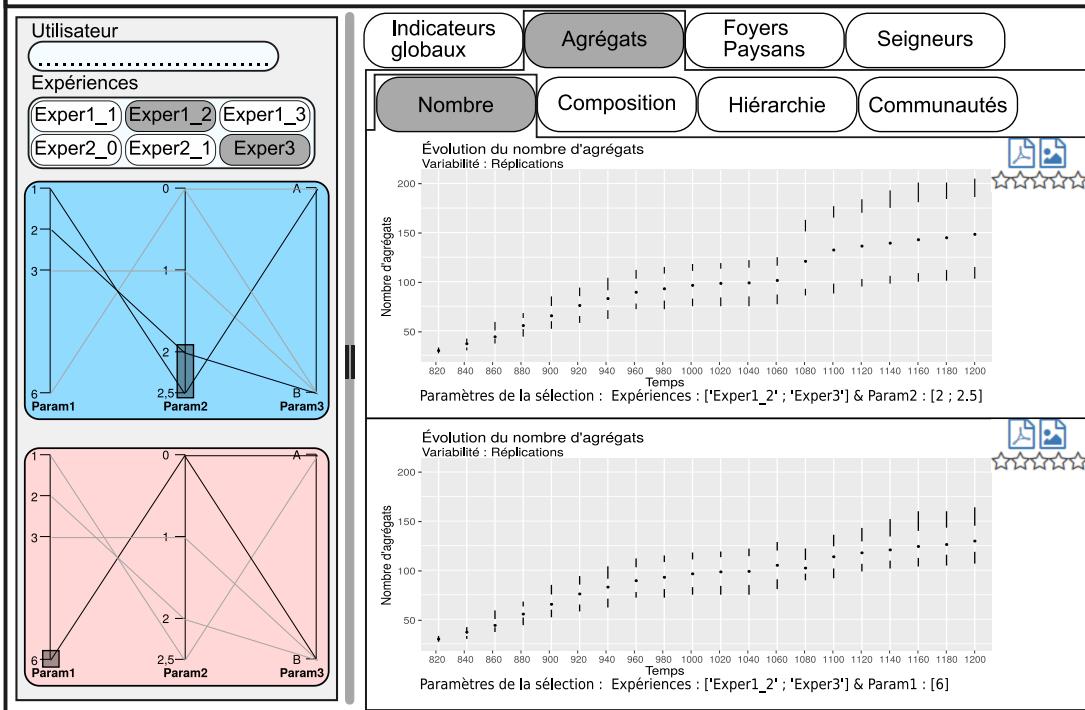
SimVADB

20 simulations sélectionnées sur un total de 260



(A) SimVADB

SIMEDB



(B) SIMEDB
FIGURE 4.23 – Comparaison visuelle de SimVADB (a) et SIMEDB (b).

Une comparaison verticale. Le premier changement tient à la disposition des « contrôleur », c'est-à-dire aux composants de l'interface sur lesquels l'utilisateur peut agir pour choisir les expériences qui sont affichées. Dans SimVADB, le seul contrôleur était un graphique en coordonnées parallèles interactif, situé dans le haut à gauche de l'interface (figure 4.23a, 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 4.24) est désormais constitué

de deux graphiques en coordonnées parallèles interactifs (en bleu et en rouge), qui agissent sur les indicateurs présentés à leur droite.

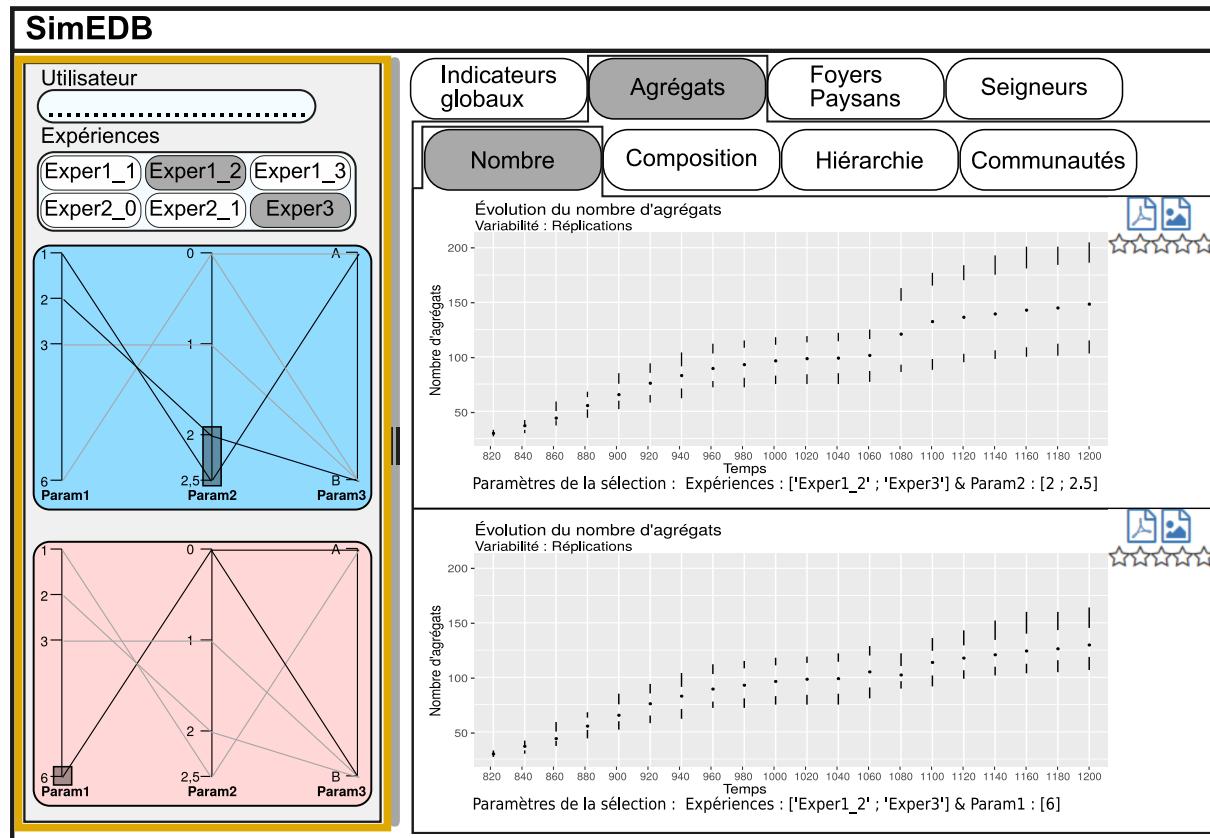


FIGURE 4.24 – La barre de contrôleurs (encadrée en orange) dans l’interface de SIMEDB.

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 les uns au dessus des autres 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 variations des valeurs attributaires, en ordonnée. Les indicateurs de ce type s’analysent plus de manière relative et longitudinale, en observant leur évolution, que de manière absolue et ponctuelle dans le temps. 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’il s’agisse du temps, de modalités d’un indicateur (petits seigneurs, grands seigneurs, etc.) 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 grandeur varient.

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 4.24), ce qui constitue presque un standard dans les interfaces modernes d'applications interactives.

Onglets et sous-onglets. Comme dans SimVADB (figure 4.23a), on a choisi de conserver dans SIMEDB 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 choisi⁶⁰.

En termes de disposition, cela force l'utilisateur à interagir avec l'application régulièrement puisque chaque indicateur est dans 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 serait rapidement atteint si l'ensemble des indicateurs étaient présentés sur une page unique. Avec notre solution d'onglets emboîtés, la démarche d'étude visuelle est certes plus longue, mais elle n'est pas gênée ou faussée par des graphiques de dimensions 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 les « dimensions » des indicateurs (section 3.2.3), par exemple en respectant l'ordre de consultation des indicateurs déterminé ? Les deux approches présentent des avantages, et les utilisateurs habitués auraient plutôt bénéficié d'une organisation structurée hiérarchiquement. Nous avons toutefois choisi de rendre l'utilisation de SIMEDB plus intuitive à tous, c'est-à-dire en organisant les indicateurs par type d'agents.

4.4.2.3 Choix des modes d'interactions

Avant même la conception de SIMEDB, avec la plateforme SimVADB, nous avions décidé de baser la sélection des simulations sur des graphiques en coordonnées parallèles interactifs (section 4.2.5). La logique d'ensemble du filtrage de simulations restant la même, il n'était pas nécessaire de modifier ce choix pour SIMEDB. L'accumulation d'expériences, reposant sur les variations de paramètres différents, ainsi que la démultipliation des paramètres du modèle SIMFEODAL ayant accompagné son paramétrage, ont pourtant demandé de reconsiderer l'usage de ces graphiques interactifs. Auparavant, seuls quelques paramètres étaient mobilisés et les graphiques en coordonnées parallèles

60. 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.

reposaient sur peu d'axes. Avec l'augmentation de paramètres, et donc d'axes dans les graphiques, ces derniers sont rapidement devenus illisibles 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 reposerait sur la variation d'un paramètre différent, nous avons fait en sorte que cette discrimination soit opérée 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 présentent un intérêt à être utilisés pour comparer différentes simulations. Ce faisant, le nombre de paramètres est réduit et les axes des graphiques en coordonnées parallèles sont plus lisibles. De plus, cette réduction du nombre de paramètre permet d'afficher leurs intitulés en entier, alors qu'il était nécessaire, dans SimVADB, de faire appel à une table de correspondance (figure 4.23a, partie (B)), ce compliquait l'utilisation de la plateforme et ralentissait la lecture des graphiques. L'automatisation de ce traitement permet en définitive de ne pas avoir à changer quoi que ce soit à la plateforme lors d'ajouts ou de suppressions de simulations de la base de données, ce qui concourt à l'objectif d'indépendance aux données de la plateforme 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. En complément du ciblage de valeurs spécifiques de paramètres, l'idée est donc de soustraire des choix possibles des expériences entières. Nous avons ajouté ce préfiltrage sous la forme d'une « boite de sélection (*select input*, figure 4.25) qui affiche les intitulés des simulations directement à partir de la base de données et qui permet à l'utilisateur de choisir quelles simulations prendre en compte.

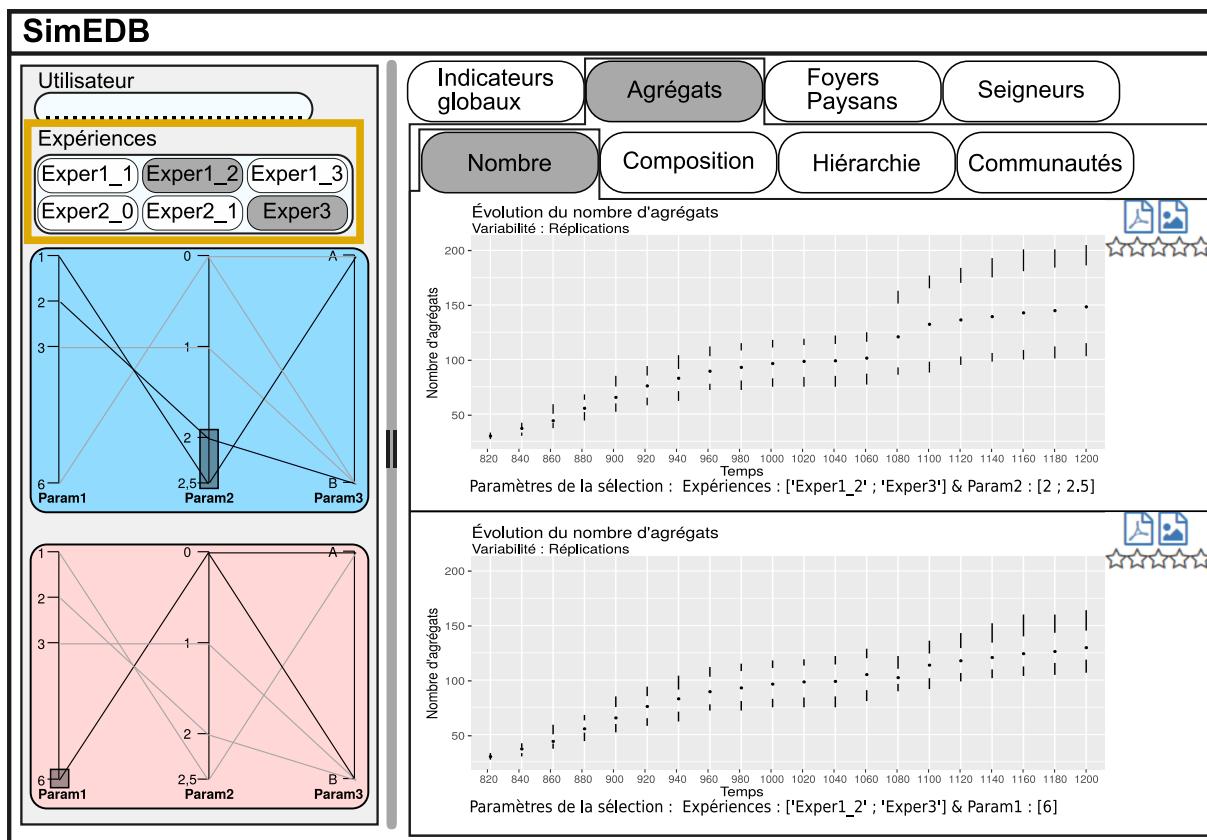


FIGURE 4.25 – Le menu de sélection des expériences (encadré en orange) qui permet un pré-filtrage des expériences à partir de leur nom.

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 petite taille, l’appréhension de l’ensemble des informations présentes dans l’interface pose ainsi un véritable problème.

En travaillant sur les séquences d’usages, par les utilisateurs, de SIMEDB, nous avons observé que le mode d’utilisation le plus classique était, dans un premier temps, de considérer le filtrage à effectuer sur les graphiques en coordonnées parallèles, en y consacrant un temps certain, avant de comparer de manière approfondie, dans un second temps seulement, les différents indicateurs de la sélection. Il n’est donc que rarement fait usage de multiples filtres successifs sur un seul indicateur 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 4.26 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

CHAPITRE 4. EXPLORER VISUELLEMENT DES DONNÉES DE SIMULATION MASSIVES POUR ANALYSER LE COMPORTEMENT D'UN MODÈLE.

effectuer une sélection plus simplement. Une fois la sélection effectuée, il pourra diminuer la largeur du panneau afin d'augmenter la zone disponible pour les indicateurs de sorties de simulation, et donc la taille des graphiques représentant ces derniers.

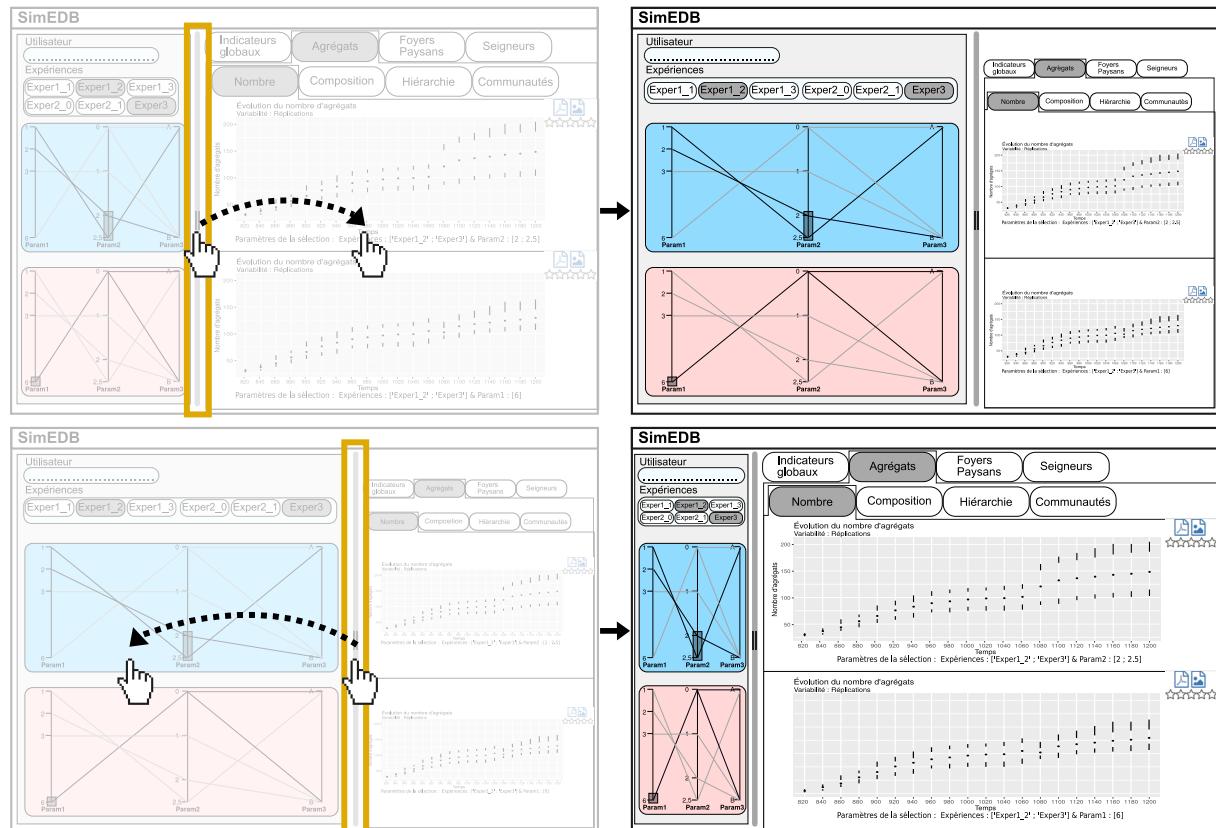


FIGURE 4.26 – Utilisation interactive de SIMEDB et redimensionnement du panneau de contrôle.

Répondre aux demandes des utilisateurs. 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, de telles requêtes sont rapidement apparues : les thématiciens, mais aussi les modélisateurs, souhaitaient pouvoir exporter les graphiques correspondant aux indicateurs pour conserver une trace d'une session d'exploration.

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 ces nouvelles fonctionnalités ont alors été disponibles 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 termes 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 pour chacun des indicateurs. Cela permet d'en conserver une trace plus durable et augmente leur potentiel réutilisation.

Noter et annoter 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 exploreront. 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 d'en réaliser des analyses quantitatives : 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.

4.4.2.4 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 : <https://simedb.curia.info/presentation-video>

Conclusion

Au terme de la construction de la plateforme d'exploration, nous disposons donc d'une application, SIMEDB, conçue et développée spécifiquement pour les problématiques propres à l'exploration des données de SIMFEODAL : des données massives, répliquées et explorées sous la forme d'indices qui eux-même ont largement évolué au cours du temps. 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 champ (AMIRPOUR AMRAII 2018, p. 167-170 par exemple).

Dans ce chapitre, nous avons montré que le développement de cette plateforme – ainsi que des outils qui l'ont précédées (les rapports automatiques, le *dashboard*, le *dashboard* interactif SimVADB, etc.) – ont été fortement guidés par les contraintes et besoins identifiés, 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 plateforme SIMEDB est donc intrinsèquement pensée comme une réponse à des besoins spécifiques, mais nous avons conçu cette réponse 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 comment nous avons travaillé de manière à ce que les solutions choisies répondent à des besoins spécifiques tout en étant génériques et généralisables. Que ce soit pour passer d'une succession de rapports à une plateforme d'exploration, pour choisir un système de gestion de base de donnée ou pour sélectionner un type de modèle conceptuel de données, notre démarche s'ancre profondément dans une logique de recherche reproductible, et ce tant du point de vue technique que conceptuel et méthodologique.

Après-propos.

Dans ce chapitre, nous avons plusieurs fois insisté sur la nécessité d'enregistrer toutes les données individuelles pouvant être produites par le modèle. Néanmoins, dans les dernières versions de SIMFEODAL, suite au calibrage du modèle et à la réalisation de scénarios (voir le chapitre suivant), les données concernant les foyers paysans ont été considérablement massifiées, passant de 4 000 foyers paysans par simulation à 50 000. Chaque simulation produit donc maintenant un million (50 000 foyers × 20 pas de temps) de lignes pour les seuls foyers paysans. Multiplié par les vingt réplications de chaque expérience et la cinquantaine d'expériences qui ont été exécutées, on approche du milliard de lignes de données. L'enregistrement de ces données individuelles, dans ces conditions, aurait demandé une augmentation nette de l'infrastructure de stockage des données (une machine virtuelle peu puissante hébergée par la TGIR Huma-Num). Nous avons donc choisi, pour les seuls foyers paysans (les autres types d'agents continuent à être enregistrées individuellement) de procéder à des agrégations de données au sein-même de la plateforme de simulation (GAMA) afin que les données produites restent manipulables plus aisément.

Exploration du comportement de SimFeodal

Sommaire

Introduction	264
5.1 Calibrage du modèle et premiers résultats	265
5.1.1 Calibrage du modèle	265
5.1.2 Résultats des simulations	273
5.1.3 Après le calibrage, comment affiner le modèle ?	287
5.2 Analyser la sensibilité de SimFeodal	290
5.2.1 Méthodologie - Analyse visuelle de sensibilité.	291
5.2.2 Sélection des paramètres à analyser.	301
5.2.3 Évaluation visuelle de la sensibilité	306
5.2.4 Analyser la sensibilité à l'aléa	318
5.2.5 Quels apports de l'analyse visuelle de sensibilité ?	321
Conclusion	323

Introduction

Les chapitres précédents ont présenté le modèle SIMFEODAL (chapitre 2), la manière de l'évaluer et la méthode suivie pour son paramétrage (chapitre 3) et les outils développés pour mener à bien ces étapes de construction et d'évaluation (chapitre 4). 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'attendu, et sa distribution est-elle proche des connaissances empiriques ? Observe-t-on une fixation du peuplement plus dispersée 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 présentant les conclusions les plus saillantes de ceux-ci, 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 lors des réPLICATIONS du modèle (variabilité à la stochasticité) 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.

5.1 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 que de 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. encadré 3.1), 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 de s’en approcher, et nous présentons enfin les résultats de la version actuelle (6.5.4, cf. tableau 3.1) du modèle, c’est-à-dire les indicateurs de sortie de simulation, commentés selon la perspective de leur correspondance aux objectifs.

5.1.1 Calibrage du modèle

La phase de calibrage est particulière parmi les nombreuses étapes de paramétrage décrites dans le chapitre 3 (tableau 3.1). 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 contrôlé et aussi 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 (figure 3.8, p. 156). Pourtant, dans le cas de ces éléments de contexte, les paramètres sont étroitement liés, de manière quasi-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 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 rigou-

reuse et scientifique, et indispensable à réaliser sur chacun des paramètres d'un modèle qui peuvent être estimés ou ajustés de manière empirique et thématique. Pourtant, dans un modèle descriptif, exploratoire et surtout basé sur des dynamiques passées, la 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 calibrés 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 poursuivis en fin de simulation.

5.1.1.1 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). Au cours de cette longue période, 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 délimitation¹. Cette redéfinition de l'espace d'étude permettait en effet de pouvoir déterminer plus strictement quels éléments empiriques y inclure (châteaux, églises paroissiales, etc.) 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

1. Il n'est ainsi pas mentionné de changement relatif au diocèse de Tours dans MIROT (1950, p. 309–326) jusqu'en 1790, où Tours perd son statut d'archidiocèse (avant de le retrouver quelques années plus tard, en 1801).

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 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 (paramètre `taille_cote_monde`) a été réduite à 80 km, dont seuls 79 sont utilisables dans le cadre du modèle (voir le monde restreint, section 2.2.2.1), soit une surface de 6 240 km², équivalente à celle de la Touraine².

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, puisque la part du monde couverte par des zones de prélèvement augmente.

Population. Le nombre de foyers paysans (`init_nb_total_fp`) 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 permet par exemple d'avoir une idée de la population au début du XVII^e siècle, mais les différentes sources concernant les périodes antérieures 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 ratrappées qu'au début du XVII^e. Il est de ce fait possible d'estimer que les niveaux de populations à l'issu 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, ou encore de 30 habitants/ km².

La population initiale est bien plus difficile à estimer. Selon les sources³, 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.

2. Dans la suite de ce chapitre, nous référons au diocèse de Tours lors des mentions de la Touraine.

3. Par exemple, dans le nord de la France, Derville (1998).

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 5.2).

5.1.1.2 Calibrage des paroisses

Le calibrage du nombre et de la distribution spatiale des paroisses a posé des questions tant thématiques que méthodologiques. Dans SIMFEODAL, il existe deux mécanismes distincts de création ou promotion de paroisses (voir chapitre 2, section 2.3.4) : 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 structurellement similaire 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 et structurant spatialement.

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 émergent que l'on a calibré, par l'intermédiaire des paramètres de mécanisme agissant sur la création et la localisation des paroisses. Le calibrage de ce rôle émergent, pour les paroisses, agit ainsi comme un calibrage du contexte pour 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 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 distance 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 chapitre 2, 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 5.1 page 274), 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 globalement lié 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, etc.), le nombre de paroisses ne dépasse pas la dizaine. Ces éléments empiriques sont néanmoins insuffisants pour reconstituer précisément la hiérarchie du nombre de paroisses par villes en fonction des tailles de celles-ci, mais ils 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 du nombre de foyers paysans par paroisse urbaine (c'est-à-dire pondéré par le nombre de paroisses présentes dans l'agrégat) à partir duquel la probabilité 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 empirique⁴. 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

4. Entre 500 et 2000 typiquement.

des ajustements sur les mécanismes de définition des agrégats, et donc à un calibrage concomitant des paramètres techniques et de mécanismes impliqués dans la définition spatiale des agrégats.

5.1.1.3 Calibrage des châteaux

Le calibrage des châteaux a été plus simple du point de vue 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, comme éléments structurants du contexte spatial, revêt donc un intérêt majeur.

Nombre de châteaux. Dans les premières versions du modèle, des seuils fixes, dépendant de la puissance des seigneurs, avaient ainsi été définis pour 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), 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 5.1 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.

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.

5.1. CALIBRAGE DU MODÈLE ET PREMIERS RÉSULTATS

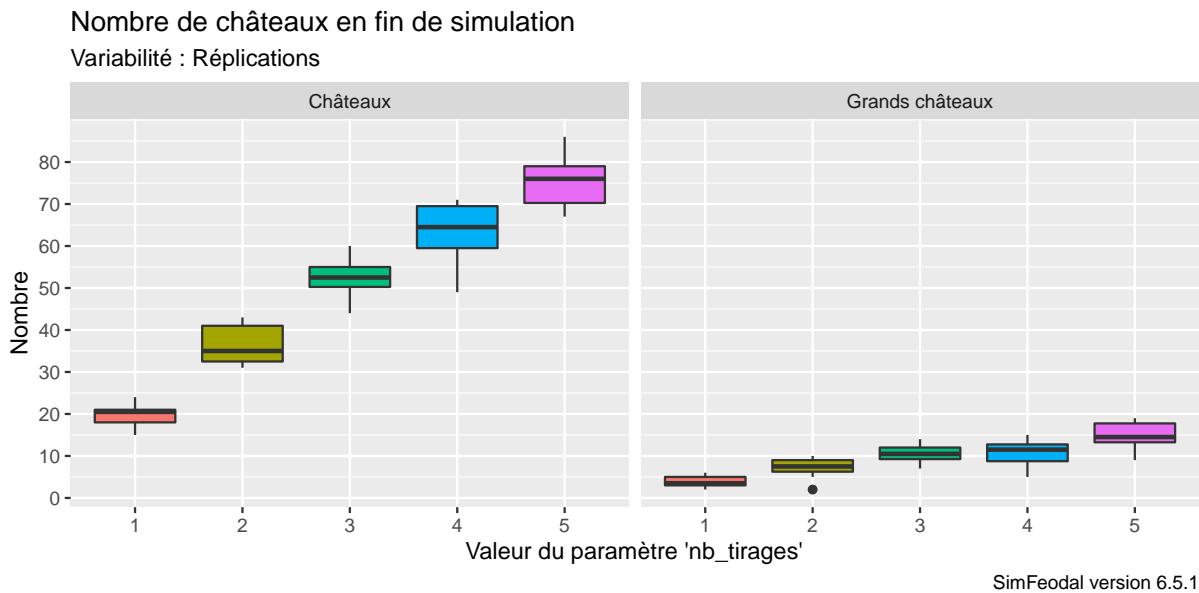


FIGURE 5.1 – Influence du paramètre nb_tirages sur le nombre de châteaux

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 5.2).

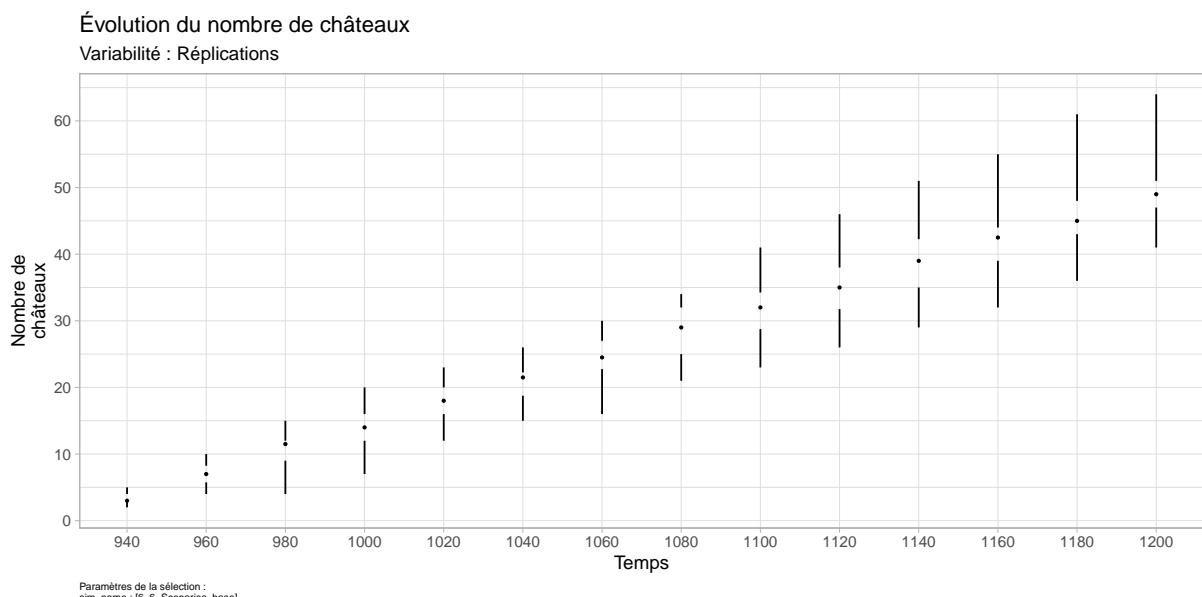


FIGURE 5.2 – Évolution du nombre de châteaux simulé par le modèle calibré.

Cet indicateur, comme une large part, est représenté par des « box-plots minimalistes ». Le point central correspond à la médiane, l'espace vide qui entoure ce point à l'intervalle inter-quartile (Q_1 et Q_3), et les « moustaches » représentent les valeurs minimales et maximales.

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 (gros et petits 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 ». 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 restants 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, différencier pour les grands et petits seigneurs, afin que les valeurs obtenues par simulation soient similaires aux valeurs empiriquement connues.

Les graphiques de la figure 5.3 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 paramètres vis-à-vis des trois indicateurs que sont le nombre et le type des châteaux, ainsi que le statut de leurs constructeurs.

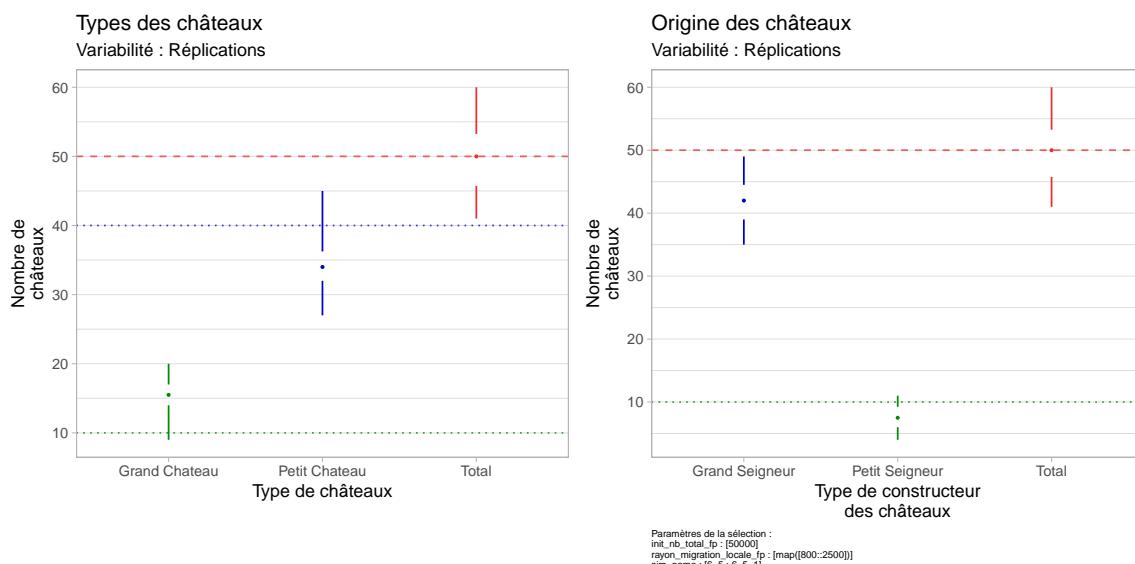


FIGURE 5.3 – Détail de la composition des châteaux en fin de simulation à l'issu du calibrage de SIMFEODAL.

Les lignes horizontales en pointillés représentent les objectifs à atteindre, définis selon les connaissances empiriques.

5.1.2 Résultats des simulations

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 : <https://simedb.curia.info/6.6>

5.1.2.1 Résumé global des résultats

Avant de chercher à analyser les résultats du modèle à une échelle fine, le tableau 5.1 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	Moyenne	Médiane	Q1	Q3	Écart-type
<i>Agrégats</i>	200	249	248	244	253	10.45
<i>Gros châteaux</i>	10	15	15	13	17	2.87
<i>Églises paroissiales</i>	300	348	348	338	359	12.96
<i>Distance moyenne entre églises</i>	3 000 m	1 459 m	1 456 m	1 391 m	1 537 m	97 m
<i>Part de foyers pay-sans isolés</i>	20 %	30 %	30 %	30 %	30 %	0.8 %
<i>Augmentation de la charge fiscale des foyers paysans</i>	× 3	× 2.4	× 2.4	× 2.4	× 2.5	× 0.03

TABLEAU 5.1 – 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 paroissiales⁷.

Concernant les autres indicateurs, on peut noter qu'ils sont en général supérieurs aux valeurs attendues, ce qui est d'autant plus significatif que la variabilité de ces indicateurs est faible (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 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 5.3 (gauche), mais ajuster davantage cette valeur aux quantités empiriques déstabilise 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.

7. 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.

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.

5.1.2.2 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 5.4).

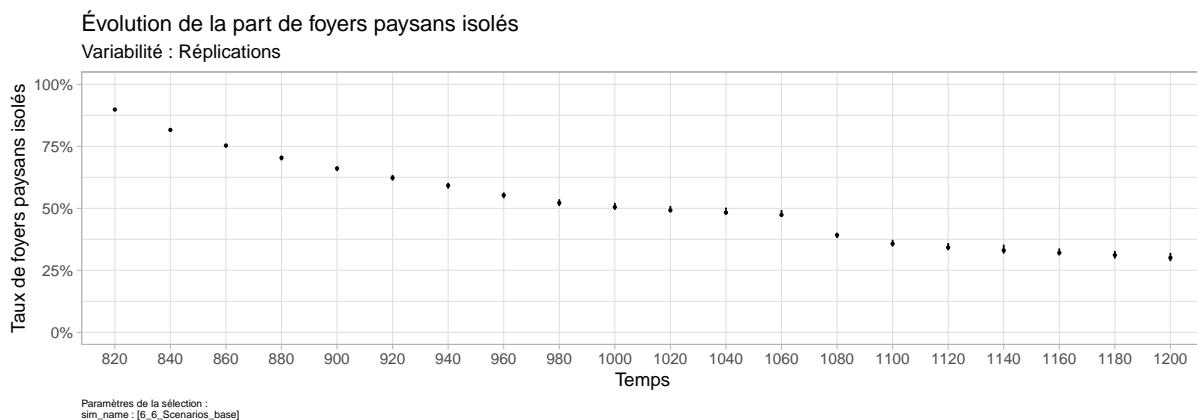


FIGURE 5.4 – Concentration des foyers paysans.

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.

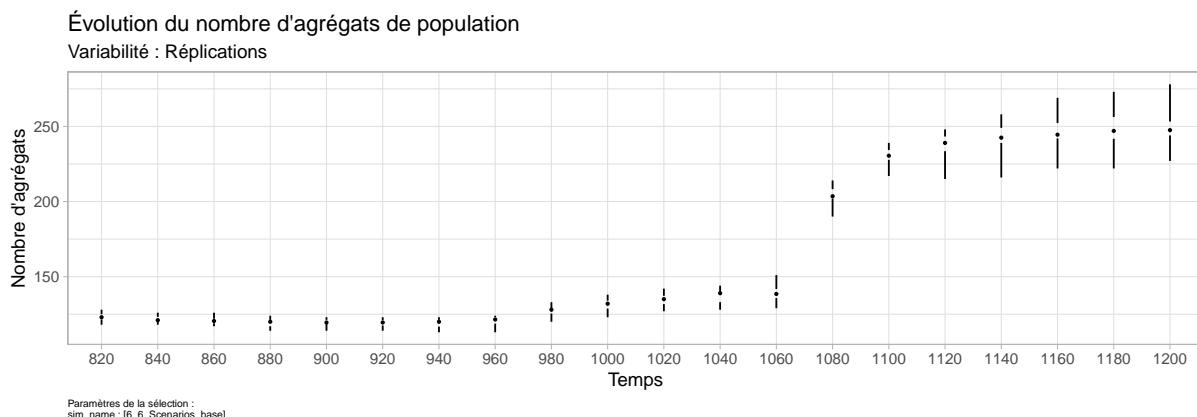


FIGURE 5.5 – Nombre d'agrégats.

La concentration des foyers paysans s'effectue à destination d'un nombre croissant d'agrégats (figure 5.5). 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 5.6-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 des premières versions du modèle.

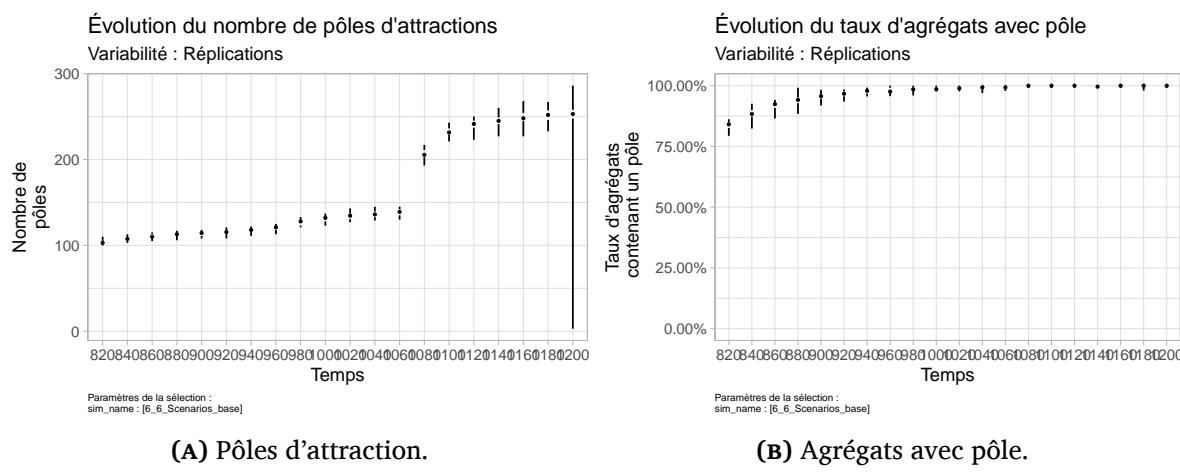


FIGURE 5.6 – Nombre de pôles et part des agrégats comprenant un pôle.

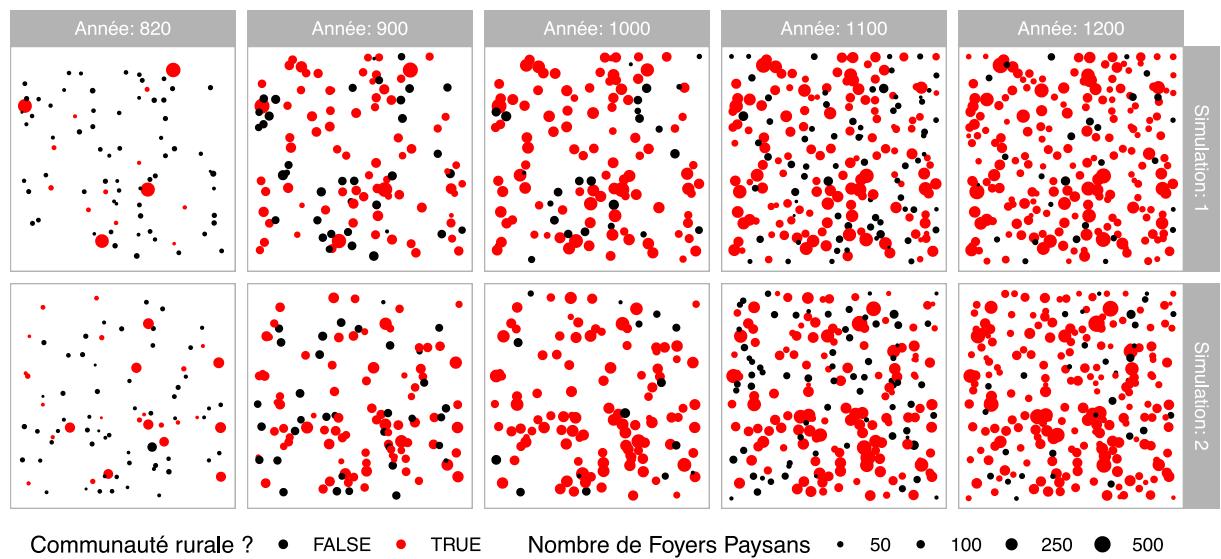
La figure 5.6-b présente elle-aussi des résultats satisfaisants, qui viennent préciser l'analyse précédente. Cette figure présente l'évolution du taux d'agrégats qui sont situés dans un pôle d'attraction. On remarque que ce taux augmente très rapidement pour ensuite se maintenir autour de 100% : cela 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 5.7 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. ».

5.1. CALIBRAGE DU MODÈLE ET PREMIERS RÉSULTATS

Population des agrégats au cours du temps

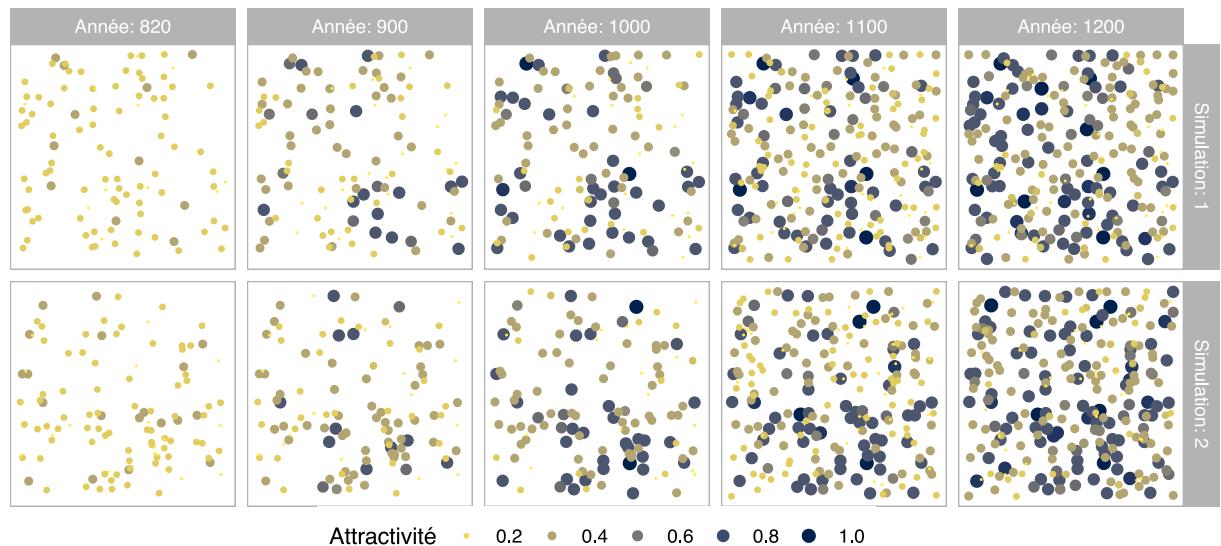
Variabilité : Aucune / Agrégats représentés : population >= 20



Paramètres de la sélection :
sim_name : [6_6_Scenarios_base]

Attractivité des pôles au cours du temps

Variabilité : Aucune



Paramètres de la sélection :
sim_name : [6_6_Scenarios_base]

FIGURE 5.7 – Dispersion spatiale des agrégats et pôles.

N.B. : Les simulations « 1 » et « 2 » sont deux réplications d'une même expérience. Leur intitulé n'a aucun autre sens que d'en permettre la différenciation.

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.

5.1.2.3 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.

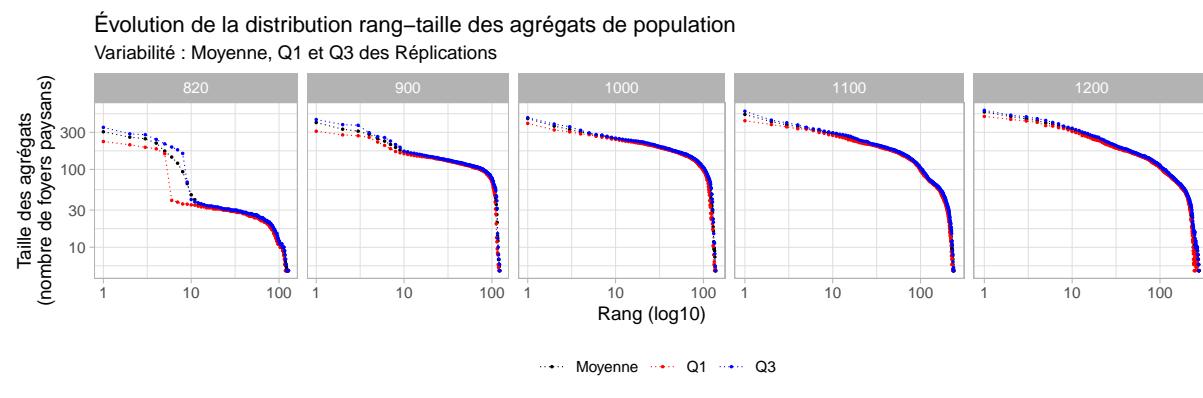


FIGURE 5.8 – Organisation hiérarchique des agrégats.

La figure 5.8 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 5.9 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. La hiérarchie des pôles peut aussi être lue dans la composition des pôles en attracteurs. Dans l'ensemble, plus un pôle contient d'agents-attracteurs, plus il est susceptible d'être attractif. Les pôles sont ainsi constitués d'agents-attracteurs, chacun dotés d'une valeur d'attractivité, et c'est donc leur combinaison qui définit l'attractivité des pôles.

5.1. CALIBRAGE DU MODÈLE ET PREMIERS RÉSULTATS

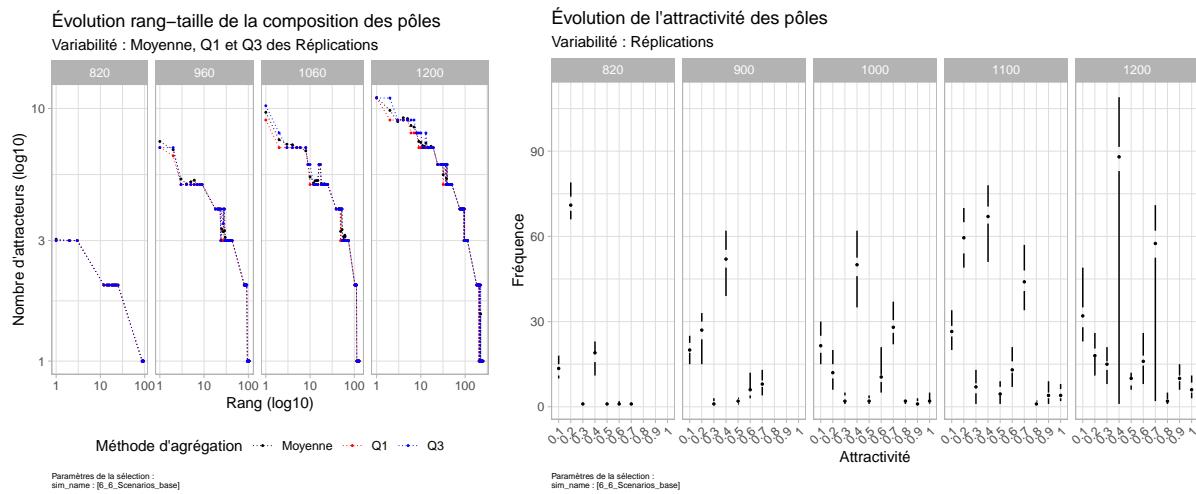


FIGURE 5.9 – Organisation hiérarchique des pôles.

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 due à une croissance plus que proportionnelle 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, etc.) de la région d'étude, organisées autour de châteaux et composées de multiples églises paroissiales. La figure 5.9-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, etc.).

Un dernier élément du modèle en lien avec la hiérarchisation du peuplement est 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 5.10, 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 dans le dernier siècle simulé. Le nombre maximum de paroissiens diminue au cours de la simulation, passant de plus de 1000 à environ 300.

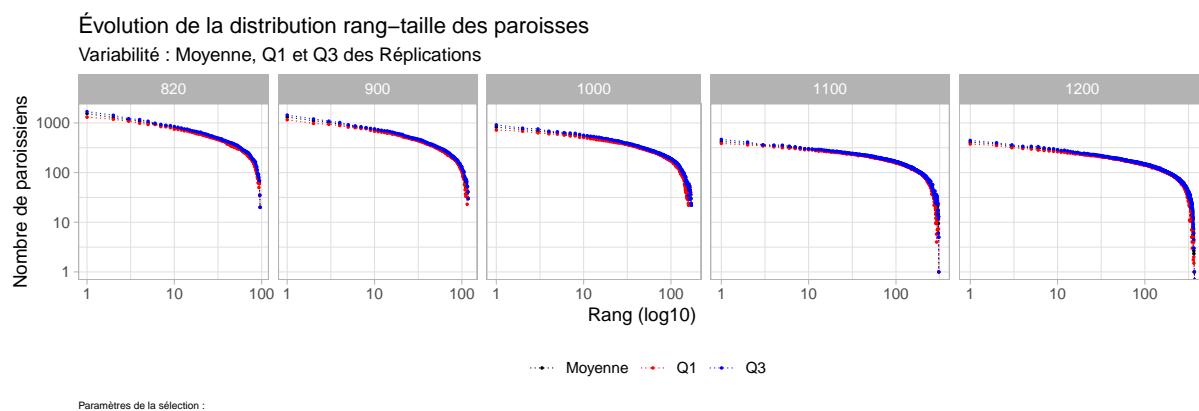


FIGURE 5.10 – Organisation hiérarchique des paroisses.

En regardant des indicateurs plus détaillés (figure 5.11), on peut remarquer que cela correspond en fait à une forte homogénéisation dans les intervalles 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 5.8).

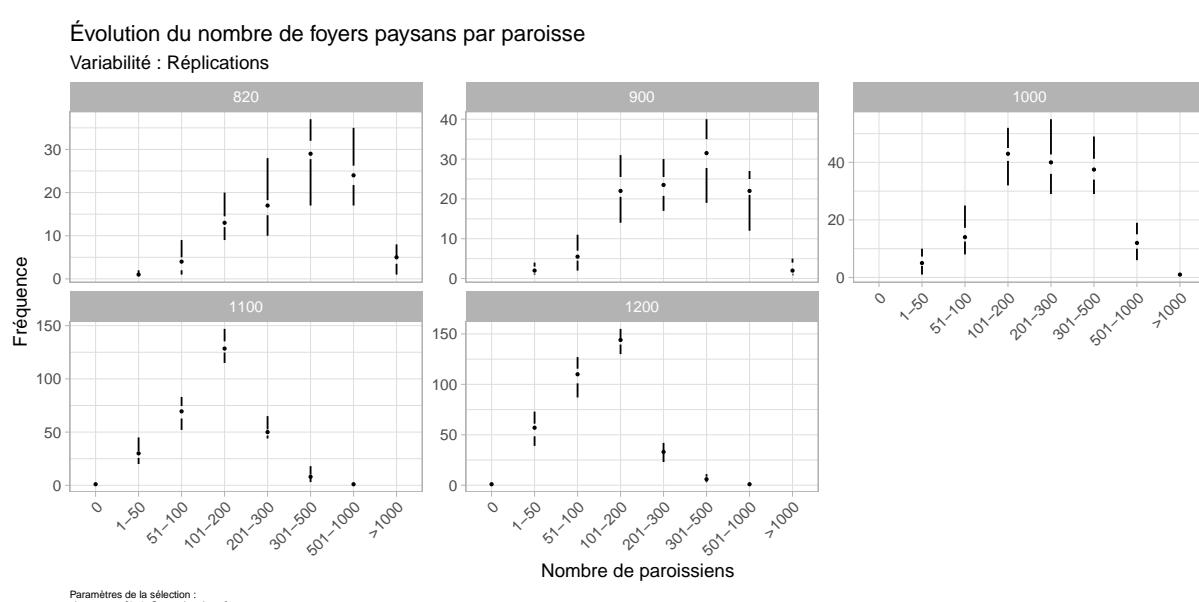


FIGURE 5.11 – Détail de la distribution hiérarchique des paroisses.

5.1. CALIBRAGE DU MODÈLE ET PREMIERS RÉSULTATS

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 est due à la faiblesse de la documentation empirique sur ces questions thématiques : il s'avère difficile d'avoir une estimation des populations à cette période féodale, ainsi la forme précise de distribution de ces populations est encore plus difficile 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.

5.1.2.4 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). Au niveau d'observation des agrégats, on devrait observer une couverture croissante, de plus en plus dense, du monde simulé.

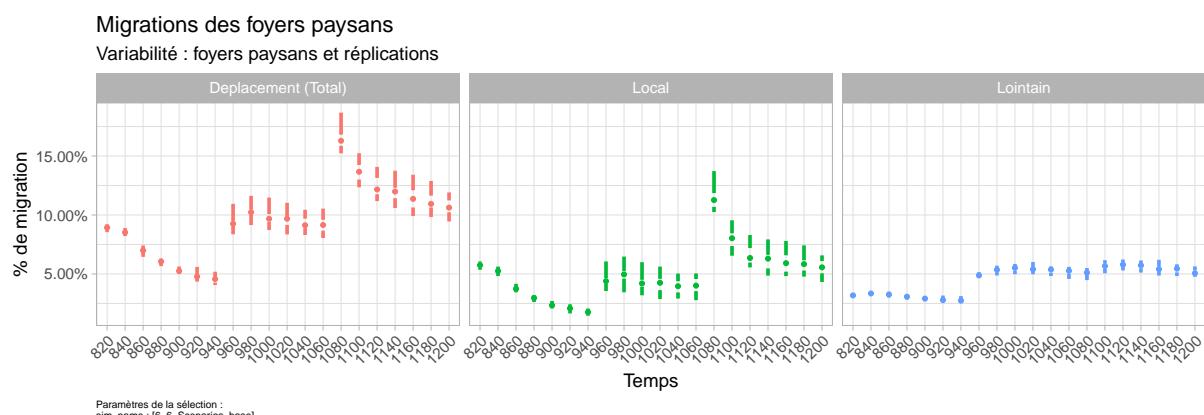


FIGURE 5.12 – Migration des foyers paysans.

Fixation des foyers paysans. La figure 5.12 illustre l'évolution des migrations, selon leur type (locale ou lointaine, cf. section 2.3.7) 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 phase. 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.
- 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.

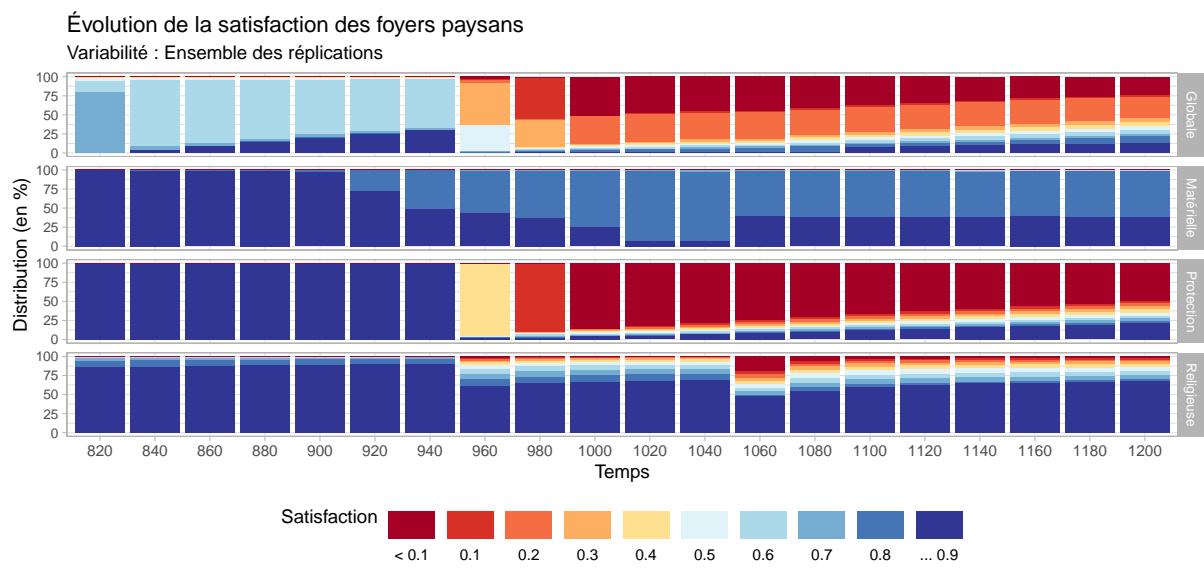


FIGURE 5.13 – Satisfaction des foyers paysans.

La lecture de la figure 5.13, 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.

5.1. CALIBRAGE DU MODÈLE ET PREMIERS RÉSULTATS

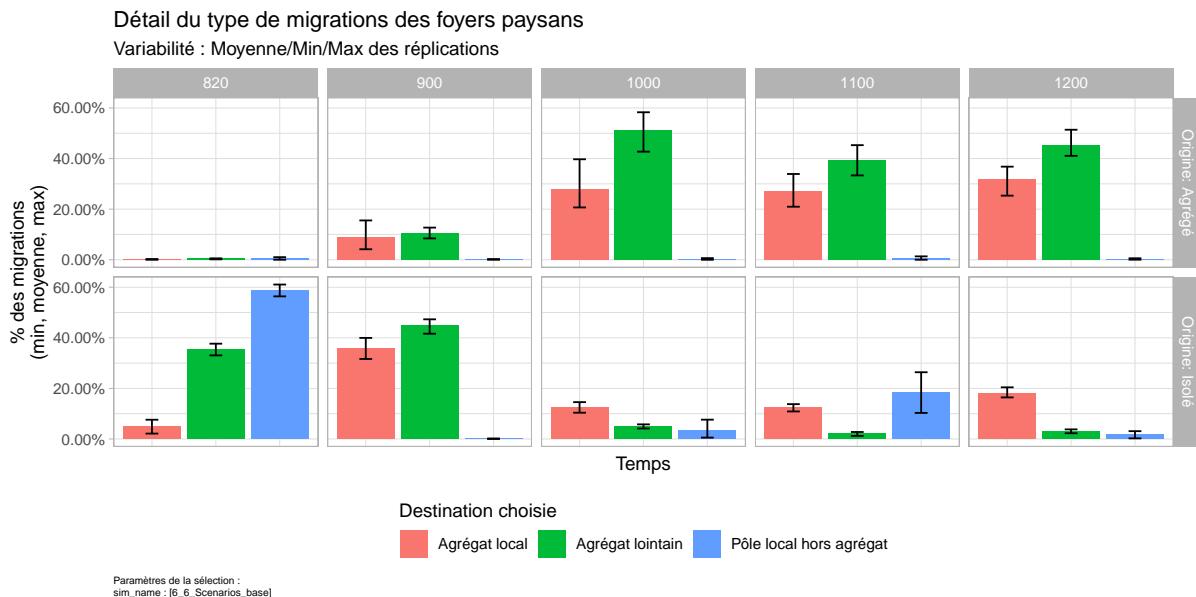


FIGURE 5.14 – Types de migration des foyers paysans.

En observant le détail des migrations (figure 5.14), 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 5.4), 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 se livrent alors une compétition.

Dissémination du peuplement. Dans le modèle, la répartition des paroisses constitue un observable intéressant pour évaluer la dissémination du peuplement. Comme les paroisses ont vocation à desservir la population des foyers paysans, elles constituent un proxy de sa répartition tout au long du temps. Les indicateurs liés (figures 5.15 à 5.17) 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 5.15). 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'augmentation du nombre de paroisses de 1080 correspond surtout à des églises rurales puisque ce sont elles qui sont susceptibles d'être promues par le mécanisme (voir section 2.7.2.3).

CHAPITRE 5. EXPLORATION DU COMPORTEMENT DE SIMFEODAL

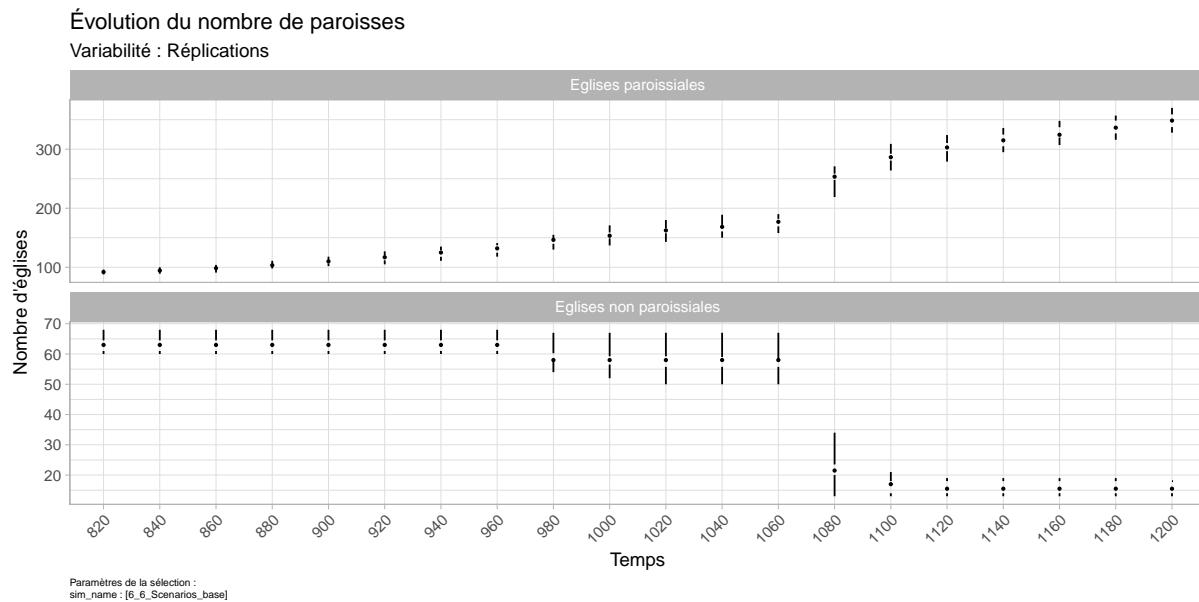


FIGURE 5.15 – Nombre de paroisses.

On constate nettement dans la figure 5.16 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 5.17), et visuellement, on constate une certaine homogénéisation et normalisation des paroisses. Les très grandes paroisses initiales (plus de 50 km² dans la figure 5.17), 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 (section 2.3.4).

Densité de paroissiens au cours du temps

Variabilité : Aucune

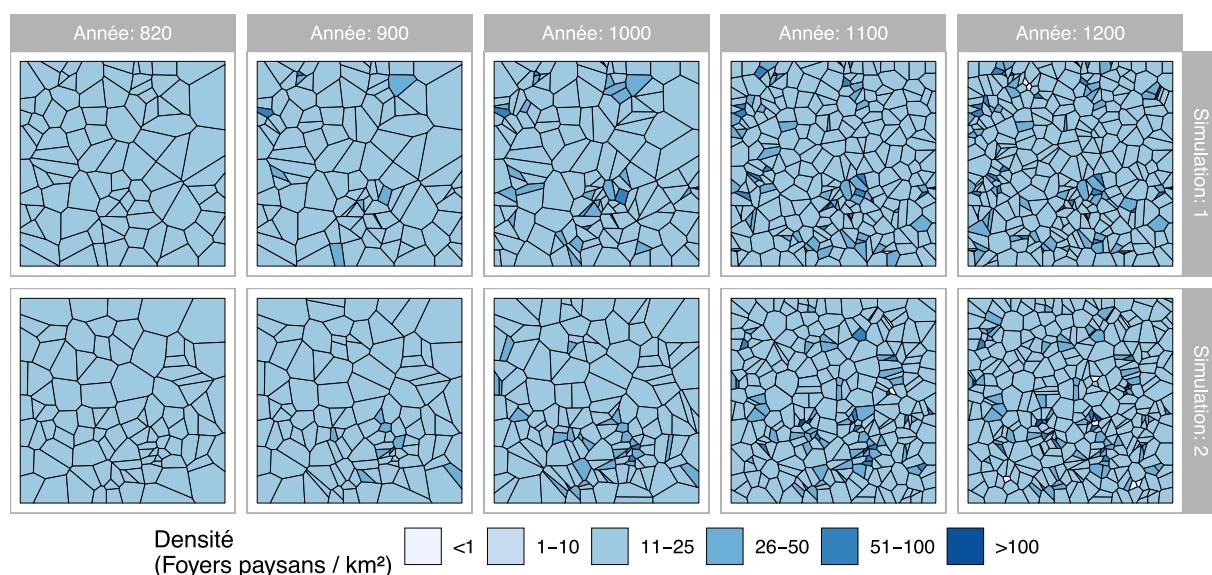


FIGURE 5.16 – Densité des paroisses et des paroissiens.

5.1. CALIBRAGE DU MODÈLE ET PREMIERS RÉSULTATS

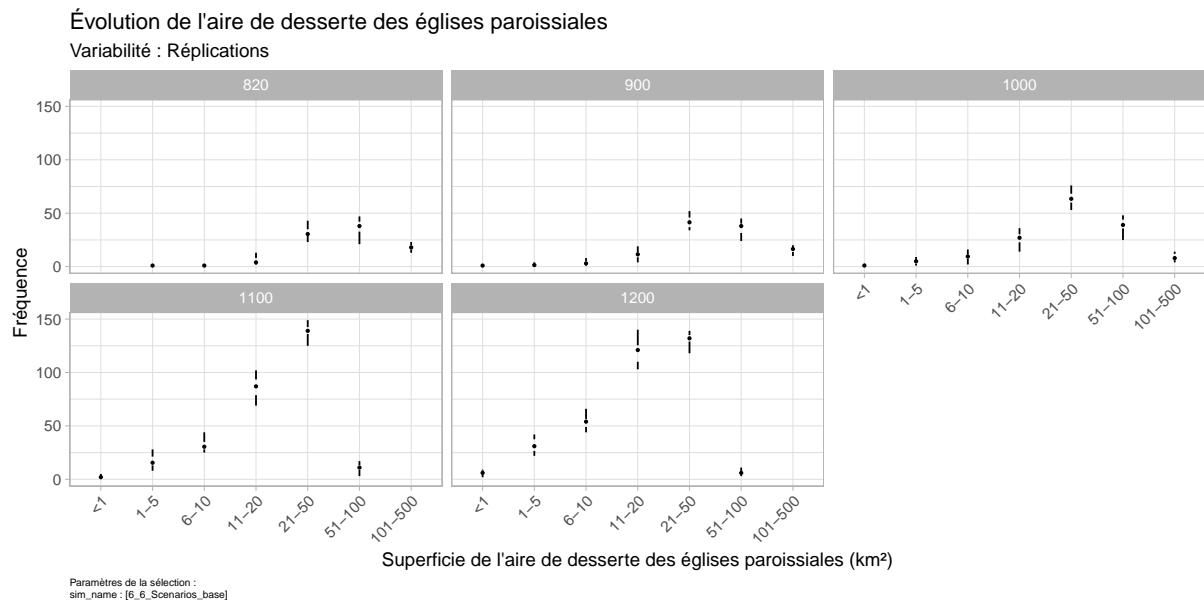


FIGURE 5.17 – Superficie des paroisses.

En second lieu, à l'échelle infra-régionale, on note une intensification très locale de paroisses (le maillage se densifie 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 paroissiales⁸.

Ces deux niveaux d'observation, combinés à la cartographie des agrégats (figure 5.7), 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.

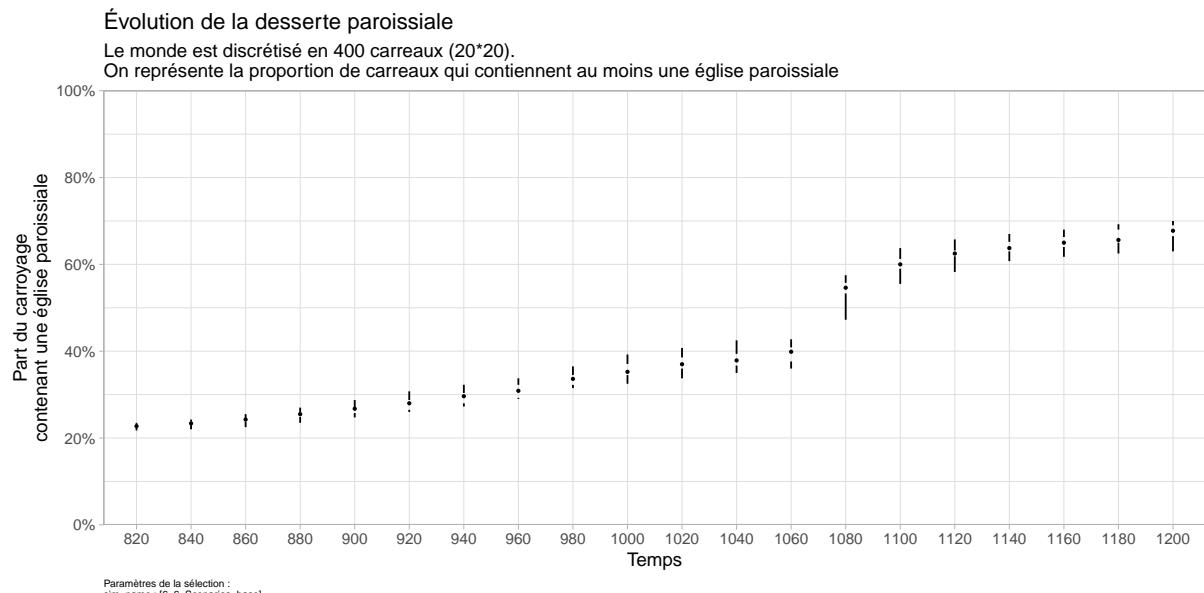


FIGURE 5.18 – Couverture de la desserte paroissiale.

Pour préciser cette mesure et obtenir un indicateur spatial agrégé des réplications⁹, on peut quantifier la couverture de l'espace qu'occupent les églises paroissiales. Dans

8. On peut le constater dans la figure 5.6-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.

9. Au contraire des cartes, qui ne peuvent décrire que des simulations particulières, l'agrégation

la figure 5.18, 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 5.15). Cela constitue un indice qui peut laisser penser 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 les processus de fixation et de dissémination qui ont été observés empiriquement en Touraine et plus généralement dans l'Europe du Nord-Ouest.

De manière générale, 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 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. De manière générale, les configurations spatiales générées par le modèle – les semis de ces agents – sont donc non agrégables et donc difficilement comparables entre les expériences autrement que d'une manière visuelle. 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. L'usage de mesures synthétiques, tirées de l'analyse spatiale, pour décrire ces configurations spatiales serait de plus peu adapté puisque ne reposant pas sur des sources empiriques suffisamment précises.

spatiale n'étant pas possible dans le monde théorique fluctuant qui est simulé (voir le chapitre 6, section 6.1.1 pour plus de précision).

5.1.3 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 s'affirme avec plus de force : 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, chacune ayant renforcé, sur des points spécifiques, l'ajustement aux connaissances expertes. Certains indicateurs (par exemple ceux liés aux églises), toutefois, et en particulier les indicateurs quantitatifs qui donnent un aperçu global et synthétique des résultats du modèle (section 5.1.2.1), demeurent assez éloignés des objectifs fixés. Il serait donc envisageable de chercher 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'elle appelle. Ce sentiment s'appuie sur deux raisons distinctes : la première liée au domaine empirique et la seconde au domaine du modèle.

Calibrer sans sur-ajuster. Dès le calibrage des paramètres d'*input* (section 5.1.1.1), 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 s'entrecroisent et s'imbriquent. 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 résulteront. 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 des diverses surprises permet de mieux comprendre le fonctionnement effectif du modèle et, à partir de là, du système modélisé (voir section 6.1.2).

Dans la recherche d'un calibrage mieux adapté, cette approche abductive ne permet toutefois pas véritablement de progresser ailleurs que dans la connaissance du modèle en lui-même. 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, dans le meilleur des cas, 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 ré-organiser 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

5.1. CALIBRAGE DU MODÈLE ET PREMIERS RÉSULTATS

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.

5.2 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 paramètre choisies ; variabilité des résultats due à l'aléa etc. Ces méthodes sont extrêmement nombreuses et constituent presque un champ scientifique à part entière, lié à l'évaluation de modèles 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 produits 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 paramètres¹⁰.

Les analyses peuvent être menées paramètre par paramètre, en conservant par exemple des valeurs fixes pour un jeu de paramètres de base (issus de calibrage par exemple) et en faisant varier un unique paramètre à la fois (analyse de type *OFAT*, « *one factor at a time* »). On peut aussi procéder de manière combinatoire, 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 souvent présentées 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 (figures 3.2 et 3.3). Au-delà de la validation des modèles, ce type d'analyse constitue un outil incontournable pour aider à la compréhension d'un modèle, sans nécessairement chercher à en éprouver la validité. En effet, 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 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. Ainsi, pour SIMFEODAL, l'analyse de sensi-

10. 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.

bilité doit permettre de gagner en compréhension du modèle, et en conséquence, des dynamiques modélisées.

Dans cette partie, nous nous en tiendrons à une analyse de sensibilité sommaire, orientée vers une évaluation visuelle, à l'instar des autres démarches d'évaluation du modèle mises en places. La nature descriptive et exploratoire – donc avec un modèle dont les composants, dont les paramètres, sont hétérogènes – de SIMFEODAL rend en effet 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. L'évaluation visuelle nous semble alors tout à fait adaptée à cette hétérogénéité de paramètres, et à ce titre, nous nous inscrivons pleinement dans le raisonnement de Joanne HIRTZEL, d'autant plus que ce raisonnement est tenu dans une thèse dont l'analyse de sensibilité de modèles descriptifs est un enjeu principal :

« Ces différents constats nous ont conduit à procéder à des analyses de sensibilité locales, avec la méthode OAT¹¹, 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

5.2.1 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 modèle¹². Le détail des paramètres, les outputs du modèle, les traitements et les sorties graphiques sont disponibles quant à eux à cette adresse :

<https://github.com/RCura/these/tree/master/chap5/src/AnalyseSensibilite>

11. [C'est un autre acronyme de « *one factor at a time* », identique à OFAT que nous utilisons dans cette partie.]

12. Dans la branche « SensibilityAnalysis » :
<https://github.com/SimFeodal/SimFeodal/tree/SensibilityAnalysis/models>

5.2.1.1 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 factoriel 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 davantage comme des constantes que comme des paramètres, qu'ils n'auront jamais à varier, et ne requièrent ainsi pas d'être analysés.

Dans SIMFEODAL, on aurait pu par exemple écarter l'analyse des 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 donc 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 intérêt 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. 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, etc. 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 avec plus de force 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)¹³. 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 (disponibles dans l'annexe A, section A.3) 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 4 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.

13. Ces dimensions sont en fait moins « complètes » que la première, étant donné que les bornes temporelles ont une contrainte de continuité.

Sur le plan technique, les solutions de stockage et d’interrogation de données utilisées pour l’exploration des données 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 (section 4.4) 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.

D’abord, nous n’enregistrons que l’état final du modèle et non pas l’ensemble des états intermédiaires. Il n’est ainsi pas véritablement gênant de perdre l’aspect dynamique et la possibilité de comparer les rythmes du changement entre les simulations. En effet, l’analyse de sensibilité doit se concentrer sur aussi peu d’objectifs que possible. 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 5.1 : Différencier indicateurs contextuels et émergents.

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté de manière extensive les objectifs – dans tous les sens du terme – poursuivis par le modèle. Nous mobilisons 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 thématiques formulés. Ces indicateurs peuvent être qualitatifs (formes des courbes d’évolution, etc.) ou quantitatifs (taux atteints en fin de simulation). En définissant un ensemble d’objectifs, qualifiés (allures de courbes, ordres de grandeur, etc.) sinon quantifiés (indicateurs numériques), on esquisse une grille d’évaluation du modèle.

Au sein de ces indicateurs de sortie de simulation, il est une distinction que nous n’avons pas encore mobilisée, et qui nous semble indispensable pour l’analyse de la sensibilité du modèle pour laquelle il est nécessaire de réduire autant que possible la quantité d’indicateurs calculés : le distinguo entre les indicateurs « émergents » et ceux 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 induits 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 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 5.2, 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 5.2 – Les indicateurs de sortie de simulation quantitatifs de SIMFEODAL. Les lignées grisées désignent les indicateurs « contextuels ».

On a choisi de mener l'analyse de sensibilité sur les indicateurs numériques synthétiques, présentés dans le tableau 5.2. Parmi ceux-ci, on a conservé uniquement les 6 indicateurs « émergents » (encadré 5.1) : 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, sans véritable droit à l'erreur sous peine 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-Num¹⁴. 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 est bien plus raisonnable comme coût temporel.

5.2.1.2 Analyse Quantitative - Filtrage des paramètres

Devant la masse de paramètres à analyser, et de simulations dont évaluer l'état final, nous avons réalisé qu'il était difficile de mener une analyse visuelle directe de la sensibilité des paramètres. Il a été décidé de mener un premier tri quantitatif afin de filtrer un sous-ensemble de paramètres, rendant possible une étude plus approfondie. Pour cette étape, on a raisonné à l'échelle agrégée du paramètre (sans procéder valeur par valeur), en cherchant à mesurer la variabilité des indicateurs de sortie provoquée par la variation des valeurs de paramètres.

Normalisation des objectifs. Le premier problème rencontré est l'incomparabilité des indicateurs de sortie : leurs valeurs (les objectifs par exemple) ont des référentiels 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.

14. www.huma-num.fr

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 5.1). 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 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 » qui constituent une moyenne à 0 et un écart-type de 1 : le référentiel est ici fixé à partir objectifs numériques, et la dispersion est tirée des résultats des simulations de la version calibrée du modèle présentée auparavant (section 5.1.2).

$$\text{valeur_normalisée}_{\text{indicateur}_i} = \frac{\text{valeur}_{\text{indicateur}_i} - \text{valeur_attendue}_{\text{indicateur}_i}}{\sigma(\text{valeurs_calibrées}_{\text{indicateur}_i})}$$

Ainsi conçue, la valeur normalisée permet de comparer les valeurs des indicateurs puisque les ordres de grandeur sont désormais similaires.

Calcul de la sensibilité globale des paramètres. Comme les valeurs des indicateurs sont désormais normalisées, il est possible de mener des opérations conjointes sur les différents indicateurs. On définit un indice global caractéristique de chaque paramètre, intitulé « sensibilité », qui correspond à la moyenne des valeurs normalisées de 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 :

$$\text{sensibilité_globale}_{\text{paramètre}_\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{indicateurs}}} |\text{valeur_normalisée}_{\text{indicateur}_i.. \text{paramètre}_\alpha}|}{n_{\text{indicateurs}} \times n_{\text{valeurs_paramètres}_\alpha} \times n_{\text{réplications}}}$$

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 conservera 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 des risques de cette sélection à partir de la sensibilité globale est que certains paramètres, très influents sur un indicateur particulier, aient une sensibilité globale assez moyenne ou faible, par effet de « resserrement » des moyennes. Pour ne pas risquer de négliger de tels paramètres, on complétera la sélection précédente par une sélection des trois paramètres les plus sensibles¹⁵ sur chacun des 6 indicateurs.

$$\text{sensibilité}(\text{paramètre}_\alpha, \text{indicateur}_i) = \frac{\sum_{\alpha=1}^{n_{\text{valeurs_paramètres}_\alpha}} |\text{valeurs_normalisées}_{\text{paramètre}_\alpha \text{indicateur}_i}|}{n_{\text{valeurs_paramètres}_\alpha} \times n_{\text{réplications}}}$$

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.

5.2.1.3 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 5.19, la sensibilité du paramètre α sur l'indicateur n (haut droite) 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 :

15. En tant que tel, c'est le modèle qui est plus ou moins sensible aux valeurs prises par les paramètres. Par abus de langage et soucis de brièveté, dans la suite de cette partie, nous utiliserons tout de même la logique inverse de sensibilité des paramètres pour définir l'influence plus ou moins importante que les valeurs qu'ils prennent exerce sur les sorties du modèle.

5.2. ANALYSER LA SENSIBILITÉ DE SIMFEODAL

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 supposé 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 5.19 présente un exemple de mise en page de telles représentations graphiques afin de faciliter l'analyse de sensibilité visuelle.

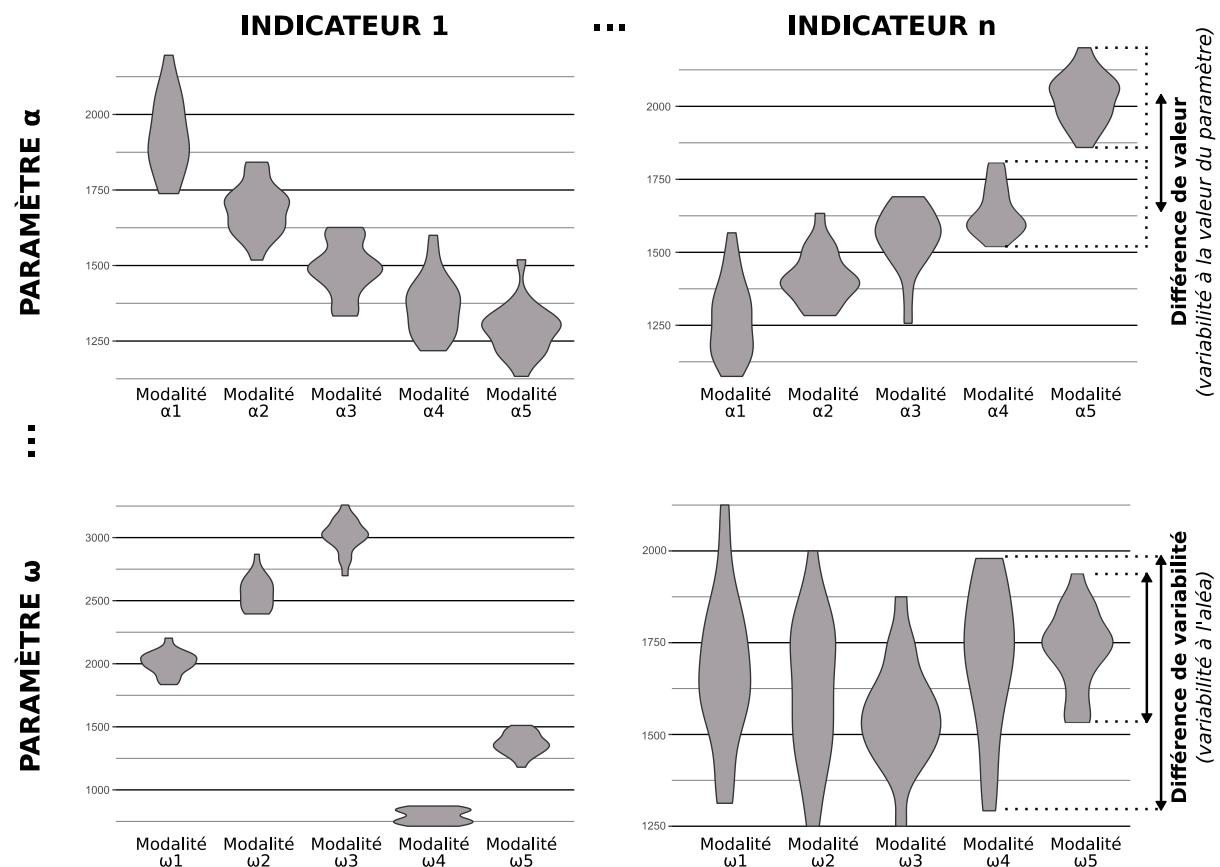


FIGURE 5.19 – Construction et mise en page de planches graphiques dédiées à l'analyse visuelle de la sensibilité de 5 modalités de ω paramètres sur n indicateurs.

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 5.2.4), 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.

5.2.2 Sélection des paramètres à analyser.

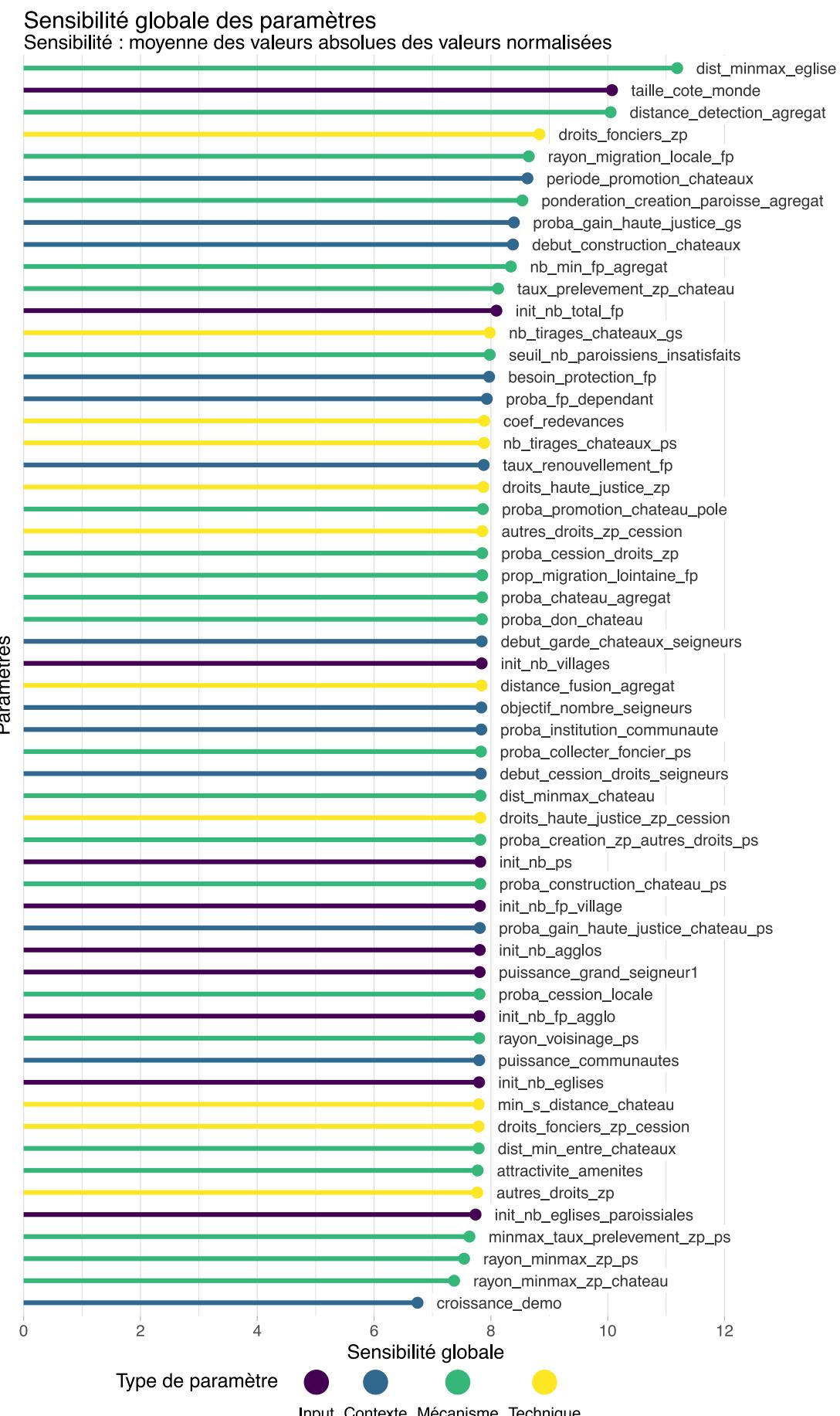


FIGURE 5.20 – Analyse de la sensibilité globale de tous les paramètres de SIMFEODAL.

La figure 5.20 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 précise 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%. 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 encadré 5.2). Pour le modélisateur, cette relative homogénéité des sensibilités est un résultat véritablement rassurant. Cela nous prouve qu'aucun paramètre n'est inutile (dans le sens où il n'agirait pas, ou très peu, sur le modèle), et ne devrait par conséquent être supprimé du modèle si on recherchait une parcimonie plus importante à cette étape (dans le cas d'un paramètre ayant une faible influence par exemple).

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_eglide`), 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 5.1.2.4), 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 5.1.1.1). 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 implanté dans le modèle, ajusté selon des valeurs empiriques. La valeur fixée (100 m) n'a pas évolué 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 5.3.

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, etc., voir p. 293), 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 A, section A.3), 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 covarier 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

CHAPITRE 5. EXPLORATION DU COMPORTEMENT DE SIMFEODAL

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 plateforme SIMEDB (figure 5.21).

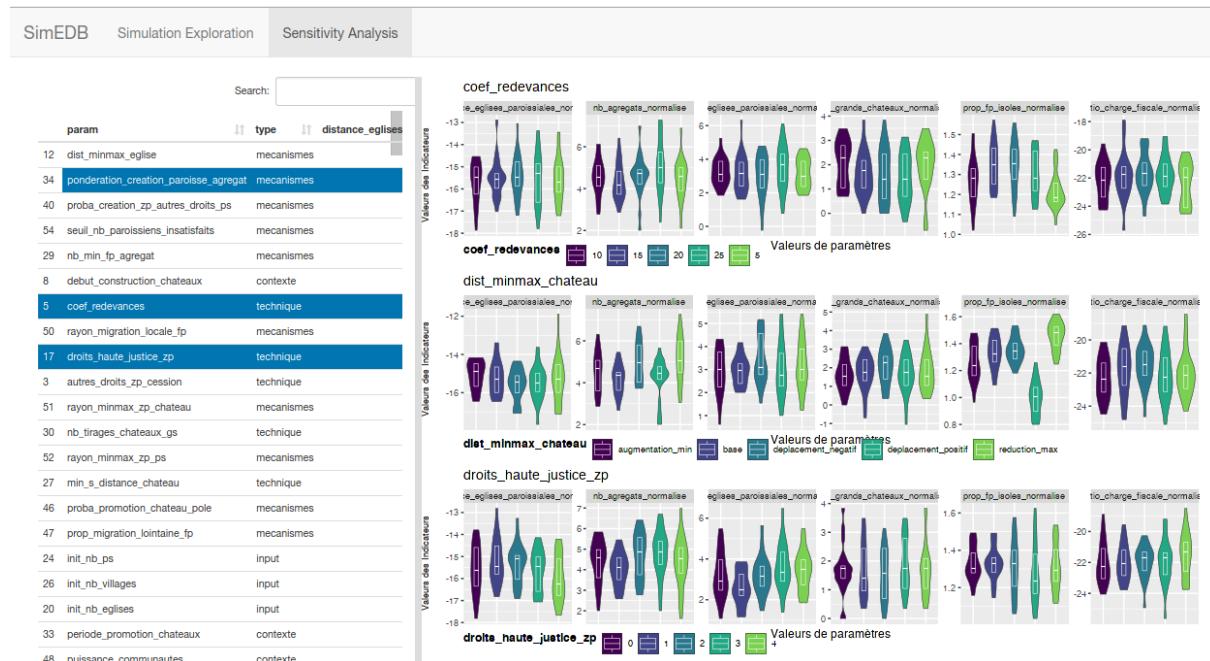


FIGURE 5.21 – Partie de l'interface de SIMEDB dédiée à l'exploration visuelle des résultats de l'analyse de sensibilité de SIMFEODAL.

Interface accessible sur <https://simedb.curia.info/analyse-sensibilite>.

5.2. ANALYSER LA SENSIBILITÉ DE SIMFEODAL

Description	Intitulé	Type de paramètre	Agents caractérisés	Valeur par défaut	Valeurs testées	Origine de la sélection	Rang sensibilité
Écartée au cours du temps) dans laquelle un foyer payan cultive 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 mise 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 aggregat	distance_detection_aggregat	Mécanisme	Aggrégats	100 m.	[50, 100, 150, 200, 300]	Globale	3
Prélèvement des 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_zp	Mécanisme	Foyers payans		- 250m tout au long : base - 1000m tout au long ; statique,reduit - 2500m jusqu'en 1000, puis 500m : 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	940 à 1040 inclus	940-1040 1000-1200 1000-1100 940-1000	Globale	6
Prolégeration (en nombre de foyers payans) de la probabilité qu'une nouvelle église paroissiale soit créée au sein d'un aggregat	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,base : 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 aggregat	nb_min_fp_aggregat	Mécanisme	Aggrégats	5	[3, 5, 7, 10, 15]	Globale	10
Proportion de foyers payans à acquitter d'droits dans chaque zone de prélèvement relevant d'un château (droits fonciers, droits de haute justice et autres droits)	taux_prelevement_zp_chateau	Mécanisme	Seigneurs	1 (100%)	[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	12
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, 0, 15, 0, 25, 0, 35]	distance_eglises_paroissiales	13
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 & init_nb_total_fp : 40000 croissance_demo : 0,0589 & init_nb_total_fp : 13500 croissance_demo : 0,0372 & init_nb_total_fp : 20000 croissance_demo : 0,0153 & init_nb_total_fp : 30000	ratio_charge_fiscale	14

TABLEAU 5.3 – Paramètres sélectionnés pour l'analyse visuelle.

5.2.3 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.

5.2.3.1 Paramètres liés au monde simulé

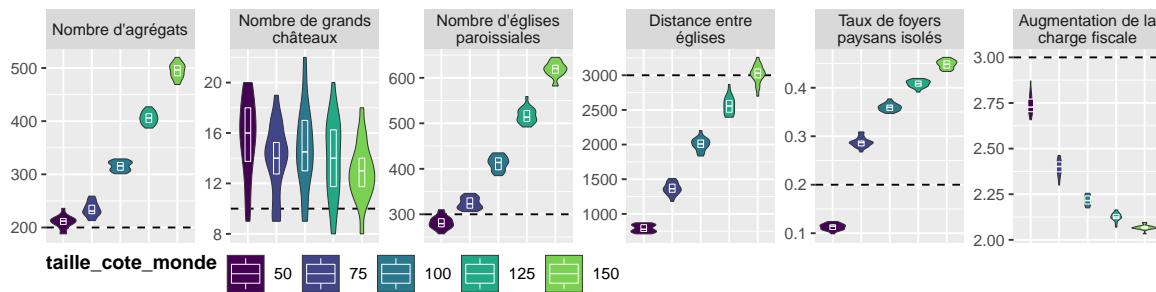


FIGURE 5.22 – Sensibilité à la taille du monde simulé.

Le paramètre régissant la taille du monde simulé (`taille_cote_monde`) est un paramètre majeur qui affecte la totalité des indicateurs étudiés, comme la figure 5.22 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 dispersés 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.

5.2.3.2 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 5.23 à 5.25), embrassent trois aspects bien différents des mécanismes gérant le comportement des foyers paysans.

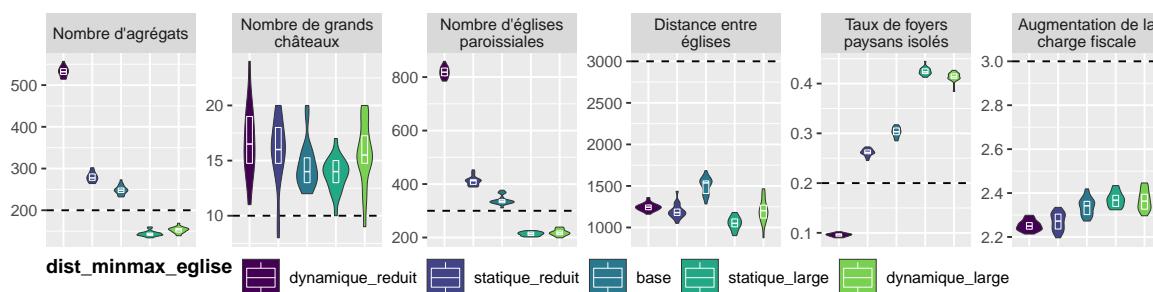


FIGURE 5.23 – Sensibilité du paramètre dist_minmax_eglise.

N.B. : Pour les paramètres à valeurs qualitatives, l'ordre de présentation des valeurs est déterminant pour l'analyse visuelle qui en sera faite. Pour ces paramètres, l'ordre suivi est ad hoc et subjectif et peut être assimilé à un ordre croissant, par exemple dans l'amplitude des étendues.

Le premier de ces paramètres (figure 5.23), 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 figure 5.13 qui présentait l'évolution de la satisfaction des foyers paysans, on remarquait que la composante « protection » était la plus importante 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 (étendues plus ou moins importantes, variables ou non au cours du temps, cf. le tableau 5.3), 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.

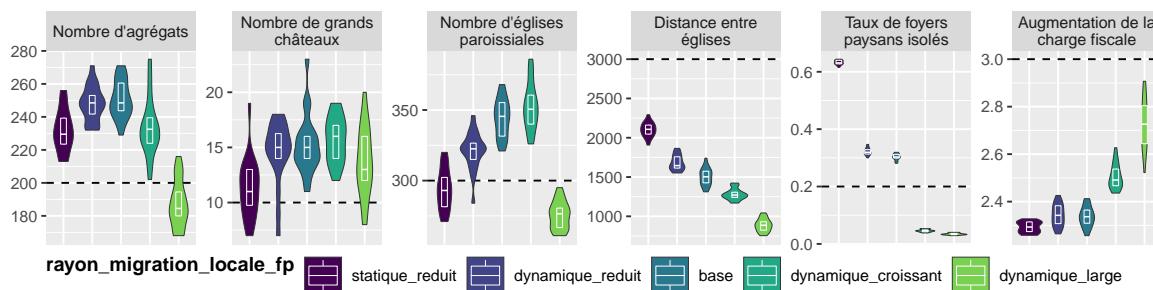


FIGURE 5.24 – Sensibilité du paramètre rayon_migration_locale_fp.

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 5.24). Celui-ci n'est pas une étendue, mais un rayon maximum qui peut changer au cours du temps (valeurs « dynamiques »). 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.

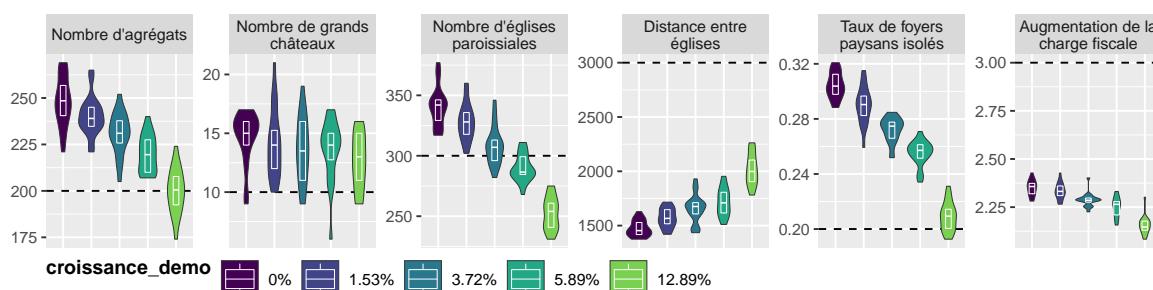


FIGURE 5.25 – Sensibilité du paramètre croissance_demo.

Le paramètre de croissance démographique régit un mécanisme particulier dans le modèle, puisque par hypothèse, on a choisi de considérer une population stable dans

16. Reproduisant ainsi *in silico* la diminution des coûts de distance-temps qui témoignent de l'intégration d'un système de peuplement.

le déroulement du modèle.

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 5.20), ne nous paraît pas représentative de son influence effective tant l'analyse visuelle de son influence sur les indicateurs de sortie (figure 5.25) 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 5.23 et 5.24), 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 5.2 illustre une démarche d'exploration plus poussée de ce paramètre.

Encadré 5.2 : 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 ont été différents voire inexistants.

À ce jour, une quinzaine de scénarios de tels types ont été conçus, implémentés 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 égale par ailleurs : la quasi-totalité des paramètres n'a pas été modifié, et le modèle n'a donc pas été re-calibré pour être adapté à ce mécanisme, nouveau et majeur, qui a été implanté. 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
<i>Agrégats</i>	200	249	198	199
<i>Gros châteaux</i>	10	15	12	12
<i>Églises paroissiales</i>	300	348	252	253
<i>Distance moyenne entre églises</i>	3 000 m	1 459 m	1 988 m	1 975 m
<i>Part de foyers paysans isolés</i>	20 %	30 %	21 %	21 %
<i>Augmentation de la charge fiscale des foyers paysans</i>	x 3	x 2.4	x 2.6	x 2.6

TABLEAU 5.4 – 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 5.4) sont globalement satisfaisants, et même davantage que ceux 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 5.26), 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 5.5 et 5.8). La croissance du nombre d’agrégats y est assez régulière, contrairement à la version calibrée (figure 5.5) 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 5.8), 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, COTTINEAU et al. (2017) par exemple).

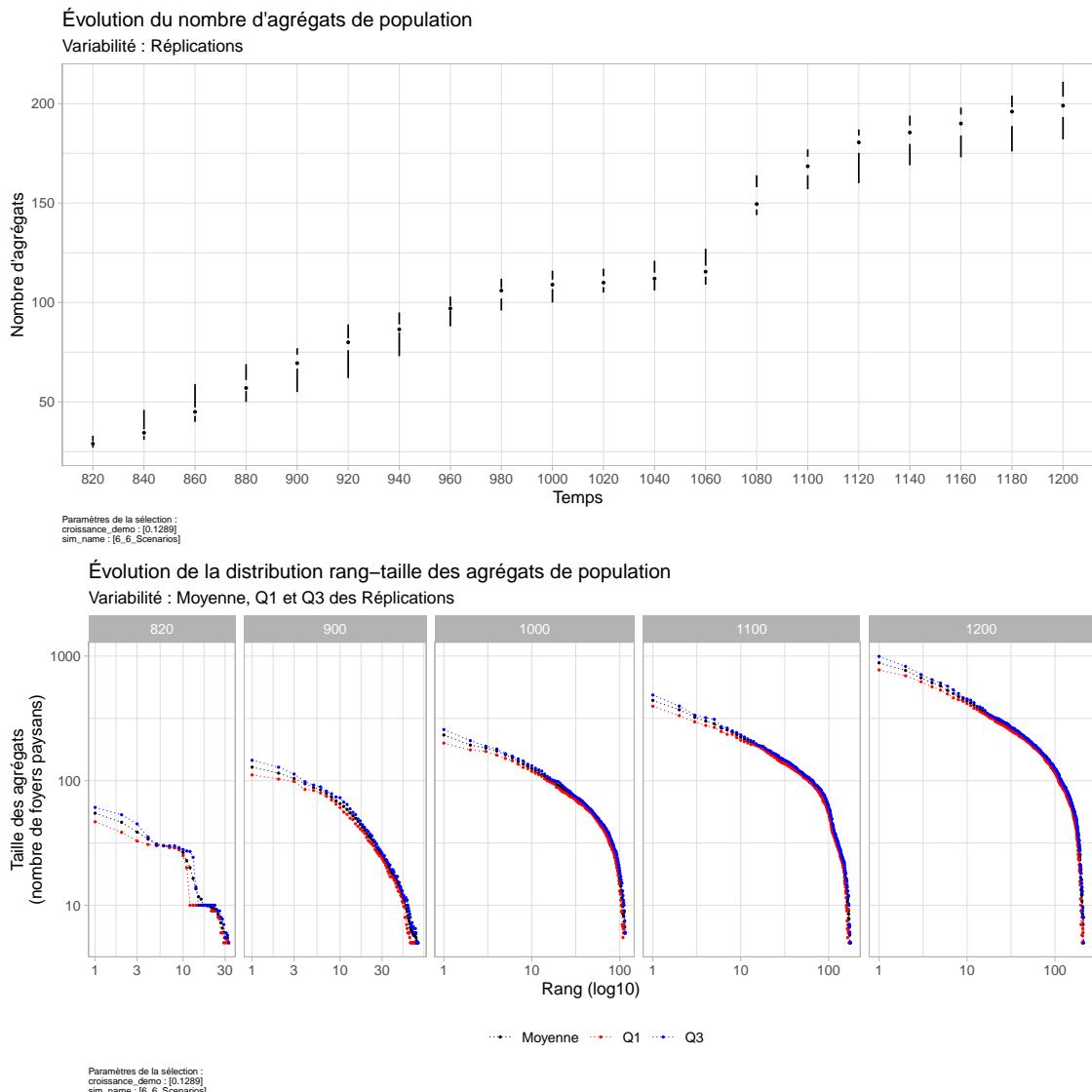


FIGURE 5.26 – Nombre et organisation des agrégats dans le scénario D2.

Nous ne détaillerons pas les autres résultats de ce scénario D2, par ailleurs d'ores et déjà explorables dans la plateforme SIMEDB (<https://simedb.curia.info/6.6vD2>), et nous contenterons d'affirmer que ce scénario répond mieux à une majorité des attentes identifiées pour SIMFEODAL. C'est particulièrement étonnant dans la mesure où le modèle n'a jamais été conçu dans l'optique de 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 5.27).

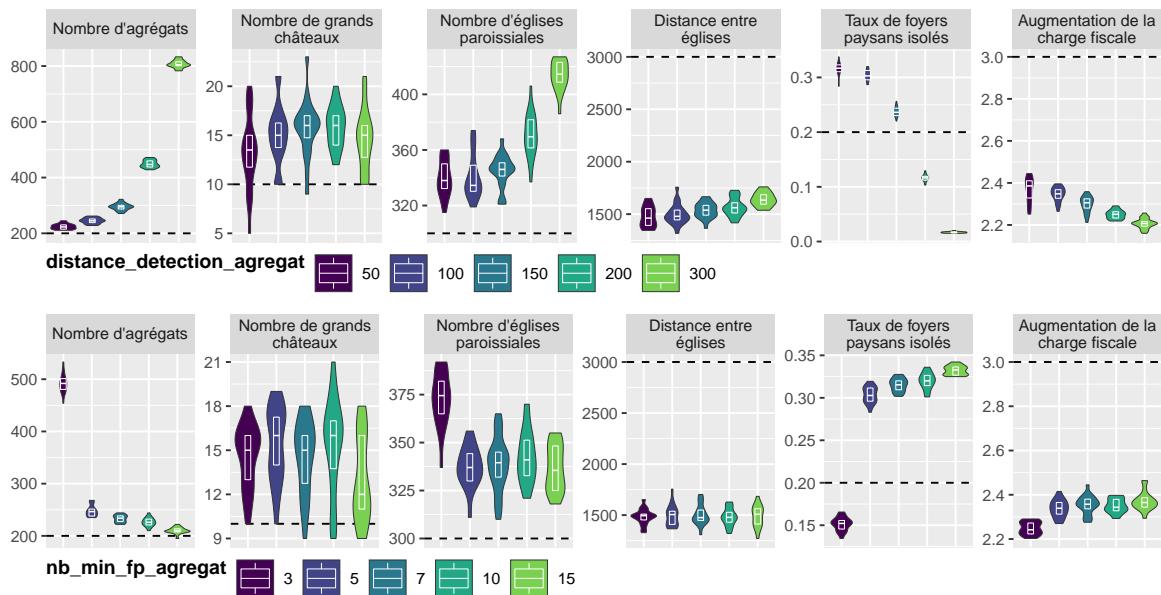


FIGURE 5.27 – Sensibilité des paramètres liés aux agrégats.

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.

5.2.3.3 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.

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....

Seigneurs. La figure 5.28 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.

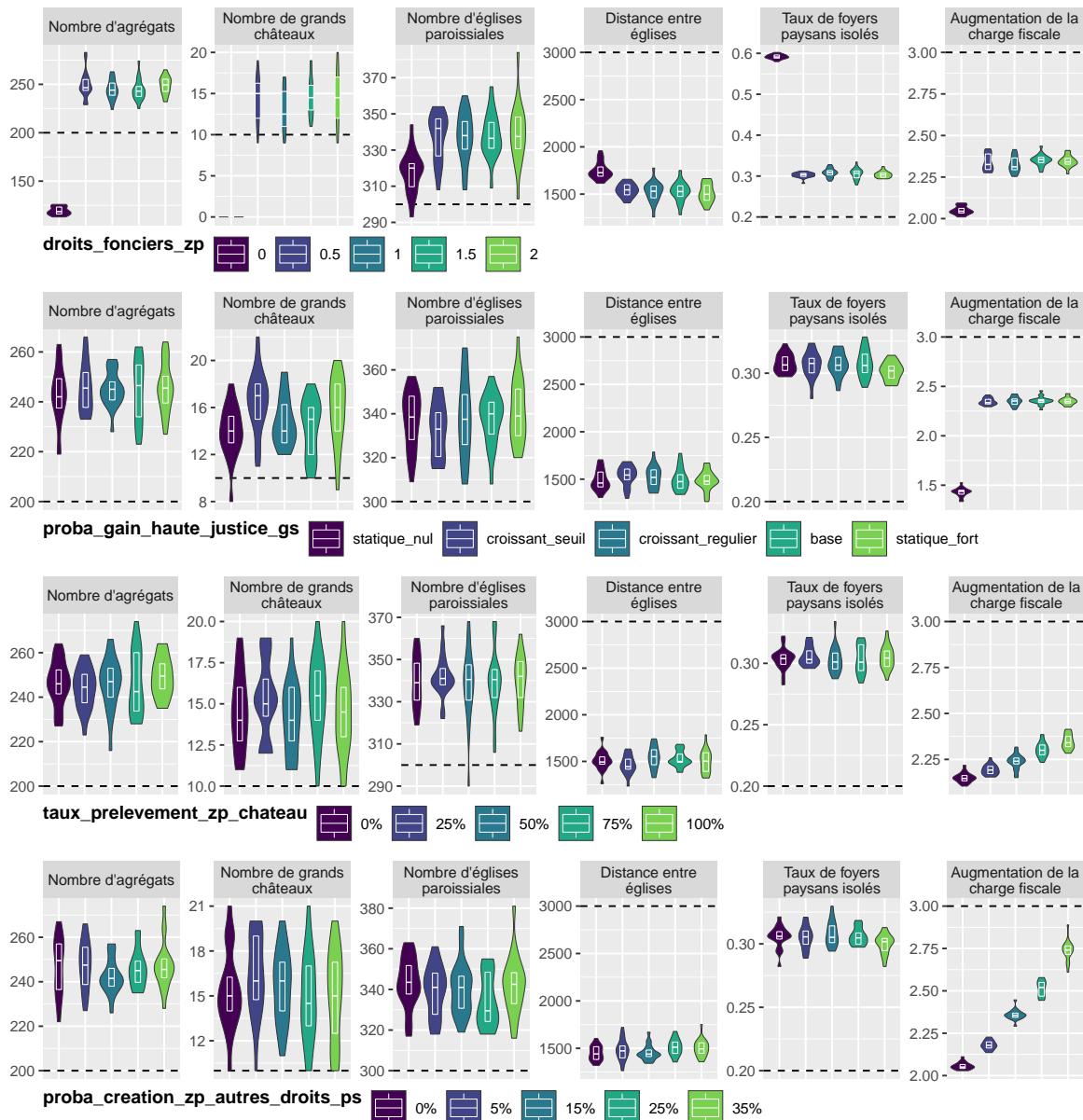


FIGURE 5.28 – Sensibilité des paramètres liés aux seigneurs.

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 (ou du moins, ne s'exprime pas assez relativement à l'influence de l'aléa). 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 (premier 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 (deuxième 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 suivants¹⁸, 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`.

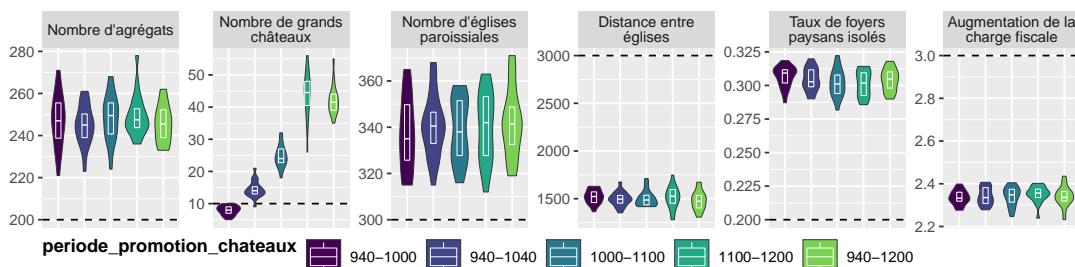


FIGURE 5.29 – Sensibilité du paramètre periode_promotion_chateaux.

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 5.29). 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.

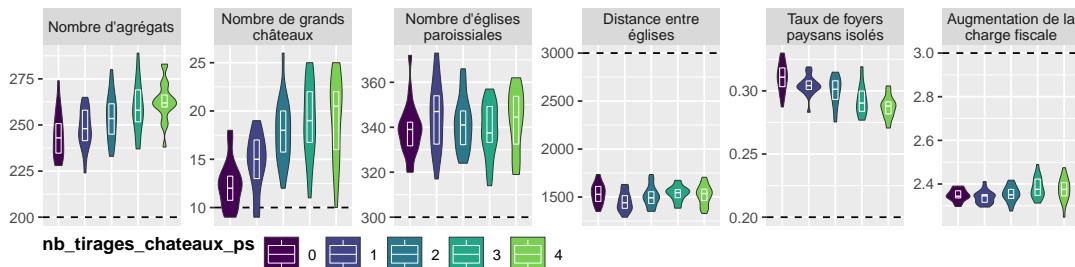


FIGURE 5.30 – Sensibilité du paramètre nb_tirages_chateaux_ps.

Les deux autres paramètres liés aux châteaux (figures 5.30 et 5.31) ont une influence qui n'est pas circonscrite 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 5.30), 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.

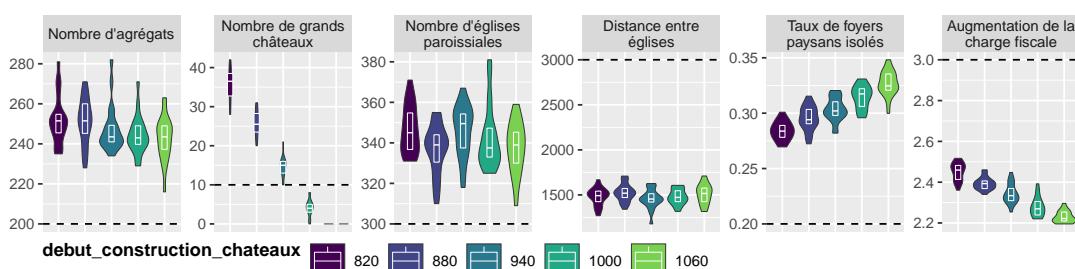


FIGURE 5.31 – Sensibilité du paramètre debut_construction_chateaux.

Celui-ci (figure 5.31) 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 5.1.1 – p. 270), 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 5.29) 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 de l'analyse de sensibilité des autres paramètres (figures 5.30 et 5.31) 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.

5.2.3.4 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.

La figure 5.32 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 large est la distance entre elles.

19. Au contraire du paramètre précédent, où une modalité plus forte impliquait plus de châteaux.

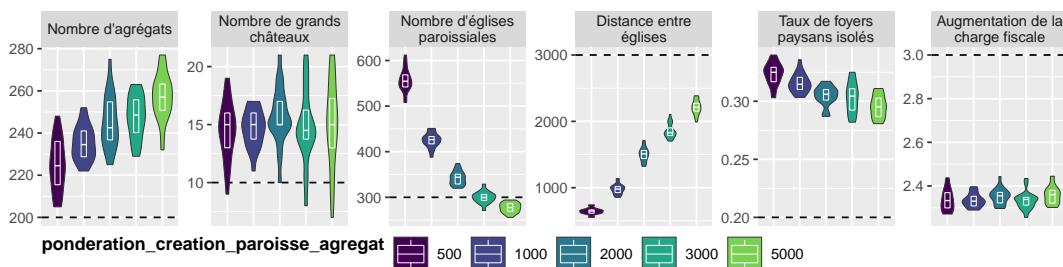


FIGURE 5.32 – Sensibilité du paramètre de pondération de création de nouvelles paroisses dans les agrégats.

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 5.2.3.2, figures 5.23 à 5.25 et 5.27). 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 5.32).

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'agrégats faiblement peuplés.

5.2.4 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 5.1) 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	× 2.4	0.030	0.013
Moyenne			0.063

TABLEAU 5.5 – Dispersion des indicateurs de sortie de la version calibrée (6.6) de SIMFEODAL.

5.2. ANALYSER LA SENSIBILITÉ DE SIMFEODAL

La comparaison des coefficients de variation tableau 5.5 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 5.24 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 5.32) 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 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. »

ibid., 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 5.5) de l'amplitude de ces valeurs.

La distribution de ces valeurs d'incertitude relatives est présenté dans la figure 5.33. 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 5.1.2). 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.

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.

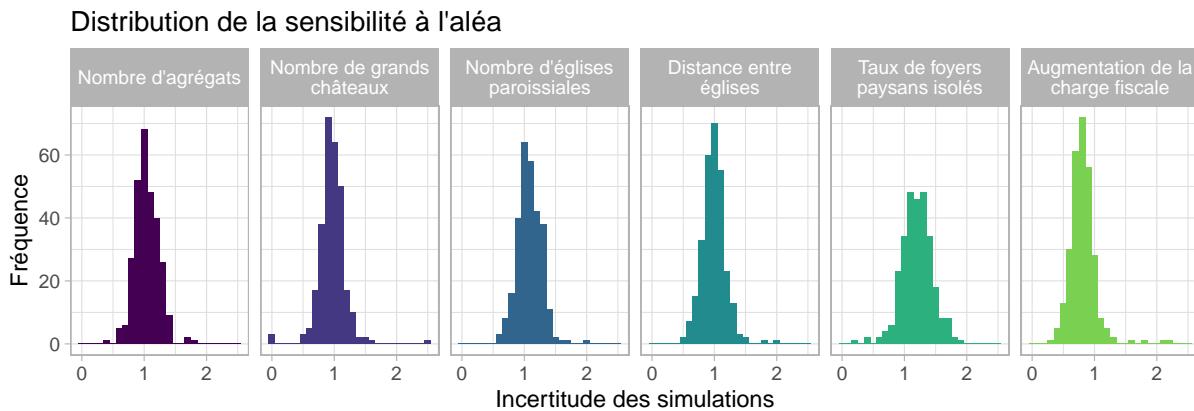


FIGURE 5.33 – Sensibilité à l'aléa selon les indicateurs.

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.

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 5.34.

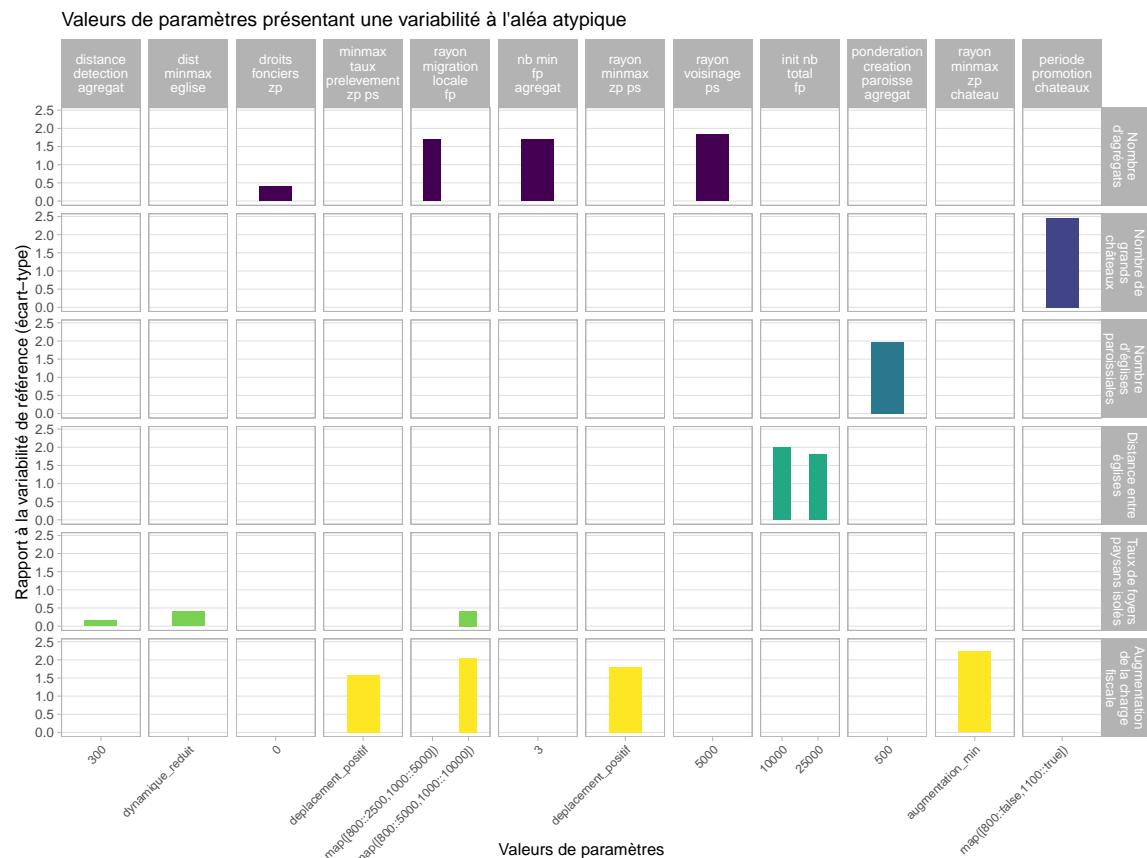


FIGURE 5.34 – Paramètres présentant des sensibilités atypiques à l'aléa.

De manière globale, on peut remarquer que les indicateurs relatifs aux foyers paysans (Nombre d'agrégats, taux de foyers paysans isolés et augmentation de la charge fiscale) 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 5.34). 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.

5.2.5 Quels apports de l'analyse visuelle de sensibilité ?

En dépit de certaines limites que nous avons détaillées, cette analyse de sensibilité 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.

Premièrement, notons que la hiérarchie de la sensibilité des paramètres diffère 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.

Ensuite, l'analyse de sensibilité semble confirmer que le modèle est parcimonieux, relativement à sa nature 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 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, cela constitue 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 5.1.3).

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, uniquement 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 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 5.2) 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. 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 innombrables 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.

Retours sur la co-construction et l'exploration d'un modèle en situation d'interdisciplinarité

Sommaire

Introduction	326
6.1 L'analyse exploratoire de données issues de simulation, une approche aux possibilités multiples	327
6.1.1 L'analyse exploratoire de données, un cadre théorique et méthodologique adapté à l'exploration de toutes les données spatiales et spatio-temporelles	327
6.1.2 Construction de connaissances par l'exploration visuelle d'un modèle	332
6.1.3 Comment passer de l'exploration à la validation? Quelques perspectives	335
6.1.4 Conclusion : Pour un recours systématique à la visualisation dans l'analyse de modèles	339
6.2 Retours sur la co-construction d'un modèle de simulation descriptif	340
6.2.1 Un retour d'expérience critique sur l'usage de modèles de simulation descriptifs : les limites de l'implémentation	340
6.2.2 Quelle part effective du collectif dans la conception et l'implémentation du modèle?	343
6.2.3 La trajectoire du modèle SimFeodal	346
6.2.4 Conclusion : Modéliser avec et pour les autres.	352
Conclusion	353

Introduction

Dans les chapitres précédents, les approches suivies pour la co-construction et l'évaluation du modèle SIMFEODAL ont été décrites. Il me semble, en accord avec le positionnement exposé dans le chapitre 1, que cette démarche est porteuse quand elle est effectuée de manière véritablement collective et interdisciplinaire. Dans le cas du groupe de travail constitué autour de SIMFEODAL, cette démarche s'est révélée fructueuse. Dans le présent chapitre, je reviendrai de manière réflexive sur cette expérience de modélisation interdisciplinaire. Ce retour critique permettra 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 – me paraît devoir être mobilisée à nouveau au sein de ce retour global sur une expérience collective inscrite dans la longue durée.

On a plusieurs fois insisté, notamment dans le chapitre 3, 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 son exploration d'autre part. Ces tâches s'inscrivent en effet dans une spirale d'allers-retours constants. La discrétisation de ce continuum est forcément artificielle mais nécessaire pour le décrire de manière linéaire au sein d'une narration. Dans cette thèse, cette narration a ainsi été rectiligne, 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, j'ai choisi d'inverser cet ordre en présentant d'abord les retours liés à l'exploration visuelle des données de simulation, et, seulement ensuite les retours plus conceptuels sur le processus de co-construction interdisciplinaire d'un modèle. Cette inversion s'explique par la prépondérance qui a été accordée à la visualisation des données dans le processus d'ensemble qu'a été la construction de ce modèle. L'approche visuelle me 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.

6.1 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 cadres 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, qu'il s'agisse de simulation, de modélisation statistique ou mathématique, etc. Il me semble important, dans cette partie de revenir sur le cas spécifique de la visualisation et de l'exploration de données issues de simulation, notamment au regard de l'analyse exploratoire de données empiriques plus classiques. Une fois ces spécificités isolées, on appréciera plus globalement le rôle et l'importance de la visualisation de données dans le cadre de la modélisation. Une dernière sous-partie explorera les différentes pistes possibles d'utilisation de l'exploration visuelle des sorties de modèle, en cherchant à passer de l'exploration à la validation de modèles de simulation¹.

6.1.1 L'analyse exploratoire de données, un cadre théorique et méthodologique adapté à l'exploration de toutes les données spatiales et spatio-temporelles

Le chapitre 4 et particulièrement la présentation de la démarche d'exploration visuelle des données issues de sorties de simulations (section 4.2) 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 en effet pas spécifique aux données de simulation. Toutefois, plusieurs 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 la place des données issues de simulation dans le panorama des types de données, et nous montrons que l'analyse exploratoire de données peut tout à fait être appliquée à ces dernières, en posant quelques contraintes supplémentaires.

Parallèles entre exploration de données et exploration de modèle. Avant tout, il faut rappeler que l'exploration des données de sortie d'un modèle de simulation est une manière d'explorer le modèle de simulation en lui-même (voir section 5.2.5). Par exploration, 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 entre les mécanismes du modèle. L'exploration d'un modèle s'inscrit

1. Toute cette partie (section 6.1) s'appuie sur un chapitre d'ouvrage en cours de publication (CURA 2020, à paraître). Il est consacré au rôle et aux méthodes de la visualisation dans le domaine de la modélisation géographique. Moins synthétique que la présente partie, ce chapitre d'ouvrage peut en offrir un complément utile.

ainsi dans un parallèle très net avec l'analyse exploratoire de données (EDA). Les deux démarches sont en effet largement semblables, et contiennent les mêmes étapes.

En premier lieu, l'exploration de données et l'exploration de modèles cherchent à repérer les structures globales présentes dans les données (et modèles). Dans le premier cas, il s'agit de dégager des tendances générales depuis un jeu de données. Cela peut passer par des analyses de corrélations, par l'étude de variations des amplitudes, par la caractérisation des évolutions temporelles, etc. Pour les modèles, on cherche également, d'abord, à observer les grandes dynamiques produites par le modèle de simulation, la forme de l'évolution temporelle de ces dynamiques, les effets de rétro-action les plus visibles, etc. Explorer un modèle, c'est ainsi et avant tout comprendre les effets croisés des mécanismes sur la structure globale, agrégée, des entités modélisées.

En second lieu, l'exploration de données peut se faire par des analyses plus fines, en cherchant par exemple à discerner des groupes d'unités aux comportements différents, des *outliers*, des variables aux relations inattendues, etc. En sciences humaines et sociales, ce moment de l'analyse est souvent l'occasion d'étudier les résidus de modèles statistiques afin d'entrer dans une caractérisation plus fine des particularités de certaines entités, spatiales ou non. La démarche est là encore la même que 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 notamment de mettre en évidence les co-variations habituelles des indicateurs de sortie selon les valeurs de paramètres mobilisées. La seconde phase d'analyse visuelle, plus précise, permettait d'étudier plus avant le détail de ces variations, et même de mettre en évidence des co-variations inverses à celles de la majorité des cas (voir l'exemple du paramètre de pondération de la création de nouvelles paroisses dans les agrégats, section 5.2.3.4).

Les démarches d'analyse exploratoire de données et de modèles sont donc très similaires, reposant sur les mêmes méthodes appliquées à des objets différents. Dans les deux cas, les éléments observés sont en définitive 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 second.

Les données issues de simulation, des données spatio-temporelles « intermédiaires ». En informatique, il est classique de différencier les types de bases de données selon leur « taille » ou la masse des 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 répandues, et peuvent être traitées avec l'ensemble des solutions logicielles classiques existantes, voire à la main pour les plus ténues (régions françaises par exemple). À l'opposé, les « *big data* » représentent des données qui ne peuvent ni être stockées ni être traitées sur un ordinateur personnel classique et requièrent dès lors de faire appel à des technologies

6.1. RETOUR SUR L'ANALYSE DE DONNÉES DE SIMULATION

informatiques avancées. Entre ces deux extrêmes, j'introduis le terme de « données intermédiaires » pour désigner les données trop larges pour être traitées avec les solutions classiques, mais trop restreintes pour justifier l'emploi des techniques complexes associées au *big data*. Le tableau 6.1 exemplifie l'éventail de données qui existe entre ces deux extrêmes.

Données			Stockage et analyse		Type
Quantité	Espace disque	Exemples	Type de stockage	Outils d'analyse	
≤ 1 000 lignes	~ 1 Mo	Données de recensement agrégé	Fichiers textes	Traitement manuel, tableurs, SIG...	Données classiques
1 000 - 100 000 lignes	~ 1-50 Mo	Recensement détaillé			
100 000 – quelques millions de lignes	~50 Mo – 1 Go	Données individuelles, séries temporelles de capteurs multiples...		Outils statistiques interactifs (<i>GUI</i>) ou en lignes de commande (<i>CLI</i>)	
10 à 100 millions de lignes	~1 - 10 Go	Jeux de données <i>opendata</i> récents : équipements, contenu généré par les utilisateurs (tweets), <i>VGI</i> ...	Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD)	CLI (R/Python) via SQL, OLAP...	Données intermédiaires
>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>)	<i>Big data</i>

TABLEAU 6.1 – Caractérisation des données intermédiaires dans le spectre des données. Adapté de CURA (2019).

Dans la ligne grisée, les données sont trop massives pour être traitées de manière classique mais demeurent contenues dans des volumes informatiques que l'on est souvent amenés à manipuler (fichiers de films, logiciels, etc.). Ce sont ces données que l'on peut nommer « données intermédiaires ». Elles sont d'une taille largement praticable, mais posent déjà des obstacles techniques difficiles à franchir sans faire appel à des méthodes d'archivage et d'analyse de données récentes.

Ce tableau peut facilement être comparé au tableau 4.1, qui figure la massification des données issues de simulation au fur et à mesure de l'exploration d'un modèle. Ces dernières s'inscrivent tout à fait dans les mêmes problématiques que les « données intermédiaires ». Les données issues de simulation ne sont pas des *big data* car elles ne sont ni véloques, ni variables ou imprévisibles, mais leur masse requiert tout de même des outils adaptés, tant pour leur archivage que pour leur interrogation. Les solutions mises en place pour leur analyse (chapitre 4) sont précisément des solutions pensées pour ces données intermédiaires, où les infrastructures de type « bases de données analytiques » se révèlent particulièrement efficaces.

Quelles spécificités des données de simulation ? Les données issues de simulation peuvent être vues comme des données intermédiaires, mais elles s'en distinguent toutefois – notamment vis-à-vis du caractère empirique des exemples données dans le tableau 6.1 – par un certain nombre de spécificités qui complexifient leur analyse et requièrent le développement ou au moins l'usage d'outils particuliers, tels qu'illustrés dans le chapitre 4.

Au regard de certaines spécificités, on pourrait par exemple être tenté de classer ces données issues de simulation dans les *big data* plutôt que dans les données intermédiaires. Certes, 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. Cependant, 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 concomitamment. En dépit d'un contrôle complet sur la chaîne de production de données, les données issues d'expériences successives de simulation peuvent ainsi poser des problèmes d'hétérogénéité, tels qu'illustrés dans la section 4.2.3 (p. section 4.2.3).

Une autre spécificité, cette fois-ci due à la nature des modèles de simulation plus qu'à leur usage, tient à leur essence souvent stochastique. Pour analyser le comportement simulé par un modèle, il est ainsi nécessaire de prendre en compte plusieurs simulations différentes, caractérisées par un même jeu de valeurs de paramètres, mais dont l'aléa aura varié entre ces « réplications ». Pour caractériser le comportement du modèle sur chacun des indicateurs de sortie de simulation produits, il est alors indispensable de procéder à des opérations de résumé statistique (moyenne, valeurs extrêmes, etc.) sur des « agrégations » de simulations, agrégations qui sont aussi nécessaires pour la visualisation graphique de ces indicateurs. Pour les données temporelles, on peut utiliser des représentations graphiques de dispersion, tels que les *box-plots* largement employés dans ce travail.

Quant à la dimension spatiale, des typologies des opérations d'agrégations et de résumés statistiques de données spatio-temporelles existent (BACH et al. 2014 utilisent le terme de « *flattening* » pour les définir), 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, BOUKHECHBA et al. 2014) (figure 6.1) constitue un exemple d'une telle plateforme *ad hoc*, attachée aux données du modèle de colonisation d'un espace vide « HU.M.E » (COUPÉ et al. 2017a), dont elle cherchait à faciliter l'exploration. L'ambition de la plateforme VISUAGENT était d'explorer une diversité de méthodes de résumé (observer les valeurs extrêmes ou des indicateurs de dispersion plutôt que des valeurs centrales par exemple) et de rendu (représentations basées sur les combinaisons possibles de l'espace, du temps et de l'agrégation de simulations) plutôt que de construire des indicateurs habituels d'évolution (spatio-)temporels.

6.1. RETOUR SUR L'ANALYSE DE DONNÉES DE SIMULATION

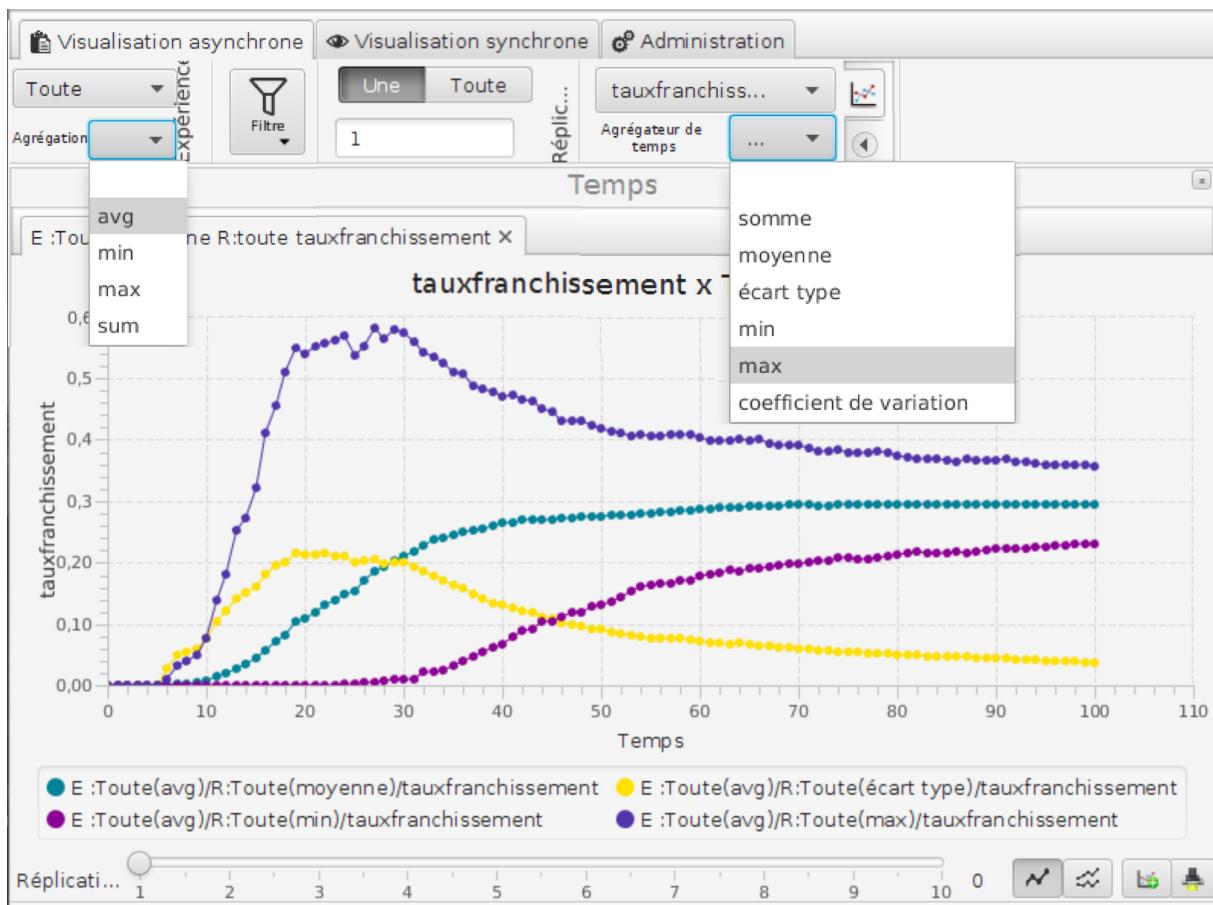


FIGURE 6.1 – Visualisation de différentes méthodes de résumés statistiques, sur les dimensions réplicatives et temporelles, avec le logiciel VISUAGENT.

Dans le cadre de données de simulation, et en particulier quand l'espace est continu², on ne peut réaliser d'agrégations des données sur la dimension spatiale que dans le cas où celle-ci est stable, c'est-à-dire que les données agrégées sont directement assimilables les unes aux autres. Dans un modèle comme SIMFEODAL, l'agrégation n'est pas possible car la répartition spatiale des agrégats, châteaux et églises change à chaque simulation (voir chapitre 2, section 2.5). La figure 6.2 illustre ce problème en présentant deux sorties théoriques de simulation, très proches en termes d'évolution, d'espace-ment, de structure globale, mais dont on ne peut tirer une représentation synthétique de manière classique puisque cela reviendrait à « créer » des positions moyenne d'objets qui ne sont pas assimilables et n'ont que peu de sens thématiquement. Pour le modélisateur, deux alternatives sont possibles. Ou bien l'on se contente d'indicateurs synthétiques numériques classiques, agrégables, mais qui ne rendront pas correctement compte de la situation spatiale, ou bien l'on mène une observation de chacune des cartes correspondant aux différentes données produites par les réplications.

2. Pour les données spatiales discrètes, par exemple quand l'espace prend la forme de cellules ou d'un maillage établi (régions, états, etc.), on peut mettre en place des systèmes graphiques de représentation de la forme des distributions d'une variable. Voir RIBECCA (2018) par exemple.

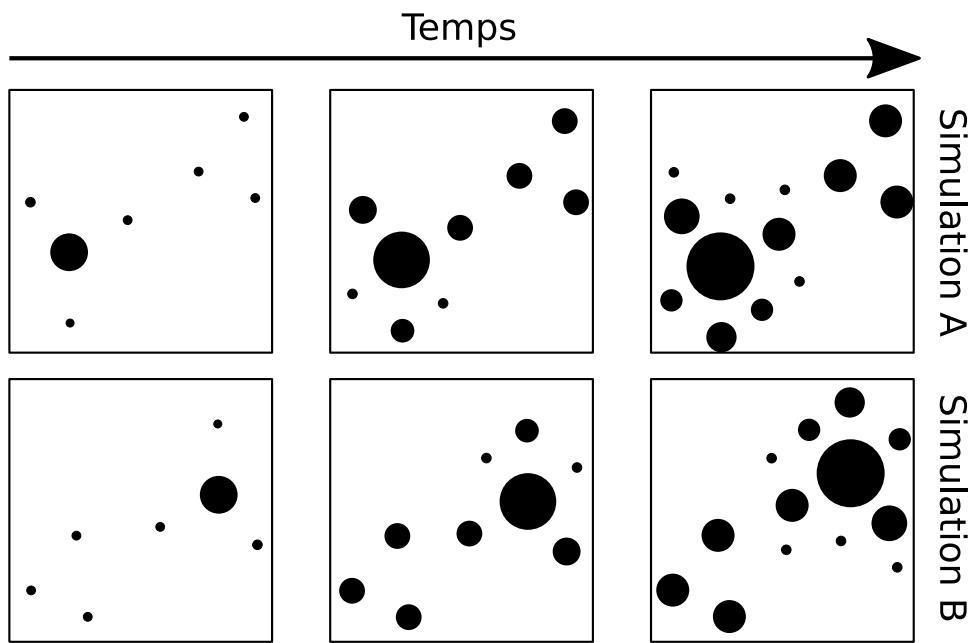


FIGURE 6.2 – Deux cas théoriques d'évolution spatio-temporelle très similaires mais non agréables. Exemples tiré de CURA (2020, à paraître)

6.1.2 Construction de connaissances 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). Dans CURA (2020, à paraître), je mène une comparaison point à point de ces neufs principes en les appliquant à la visualisation de données issues de modèles. Je reprendrai ici quelques uns des arguments qui me paraissent importants, en termes de réflexivité, sur les gains de connaissances que l'exploration visuelle d'un modèle peut apporter.

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'explicite 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 dont les indicateurs de sortie sont obtenus, afin de minimiser le risque d'erreurs d'interprétation.

Par cette explicitation, 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, endosse.

L'exploration visuelle comme modélisation. Simulation et visualisation sont des domaines scientifiques étudiés par des communautés disciplinaires différentes et peu interconnectées. 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, etc.) 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, etc.) s'intéresse notamment à l'exploration de données spatio-temporelles, à leur visualisation et leur modélisation, avec peut-être une entrée plus méthodologique et technique que le premier ensemble. Ces deux communautés communiquent peu, et cette situation n'est pas nouvelle³.

Pourtant, dans les faits, la représentation graphique telle qu'elle est utilisée et théorisée en géographie théorique et quantitative, et notamment la cartographie qui a un rôle central⁴, peut largement être considérée comme une forme de modélisation des phénomènes sociaux et spatiaux⁵ au regard des définitions d'un modèle que nous avons adoptées dans cette thèse⁶. L'exploration visuelle, composée d'une succession de compositions graphiques que l'on raffine, que l'on 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, LAMMARSCH et al. 2018). L'exploration visuelle n'est donc pas un processus isolé, particulier, et 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, comme l'évaluation de modèles dans le domaine de la modélisation, 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*, etc.). De la même manière que ces communautés évaluent les outils et méthodes de visualisation et d'exploration visuelle, on pourrait alors chercher à évaluer les méthodes proposées dans

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. 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 ».

5. À l'instar de la « modélisation graphique », ou chorématique de BRUNET (1980).

6. Voir par exemple la définition de MINSKY (1965), citée dans l'Introduction générale.

cette thèse. Il s'agirait par exemple d'évaluer la méthode d'évaluation visuelle, voire, de manière plus générale, d'évaluer l'évaluation des modèles. Dans le cadre de ce travail de thèse, je n'ai pas poussé l'analyse jusque là, mais c'est un enjeu qui me 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) de la modélisation : « modéliser c'est apprendre » (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 me semble que le processus itératif décrit caractérise la modélisation en général, ne s'exprimant pas plus dans une visée abductive – que LIVET, PHAN et SANDERS (2014) associent plus volontairement aux modèles KISS par exemple – que dans des modèles plus empirico-inductifs tels que les modèles KIDS. L'itération est, me 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.

L'exploration visuelle de modèles s'inscrit dans une logique très comparable, en favorisant également cette posture itérative et abductive (BANOS 2005, p. 239-240), recherchée dès la conceptualisation 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 elle 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. On peut alors concevoir la réalisation d'un processus de visualisation ou d'exploration visuelle dans les mêmes termes que le processus de modélisation (ANDRIENKO, LAMMARSCH et al. 2018). La visualisation de données issues du modèle est en elle-même un processus itératif, qui favorise de plus l'itérativité de la modélisation 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, et en cela, 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 6.3). Comme le résume VICTOR (2009) à propos de l'exploration visuelle interactive de modèles : « Model, Watch, Learn ».

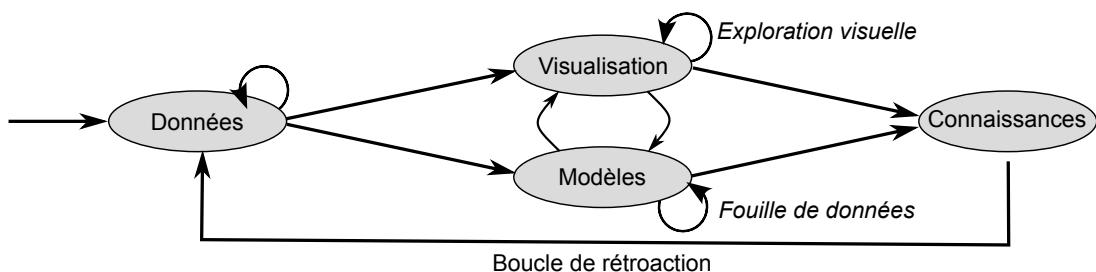


FIGURE 6.3 – Itérations entre modèles et visualisations pour enrichir les connaissances, traduit d'après KEIM, ANDRIENKO et al. (2008, fig. 1, p. 156).

6.1.3 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 d'un modèle. Notre approche, sur laquelle les paragraphes précédents constituent quelques retours, est profondément ancrée dans une approche exploratoire et graphique, dénommée « 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. On notait ainsi dans le chapitre 5 (section 5.1.2) que l'évaluation et le calibrage de SIMFEODAL était globalement satisfaisant, mais difficile à prolonger devant l'incomplétude des données empiriques. Dans les paragraphes suivants, je propose 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 évoquée auparavant, est celle des méthodes d'exploration de modèle plus automatisées et systématiques. Ces méthodes, relatives à la validation interne (voir chapitre 3, encadré 3.1), permettent d'obtenir une compréhension à la fois plus globale et plus fine du modèle. Dans la description de l'analyse de sensibilité de SIMFEODAL (section 5.2), je précisais que nous nous étions restreint à une analyse de type « *one factor at a time* », sans faire co-varier les valeurs des paramètres. Dans le cadre d'un modèle véritablement complexe et doté de très nombreux paramètres qui conditionnent des mécanismes dont l'interaction est importante⁷, il est évident que modifier chaque paramètre indépendamment des autres ne permet de rendre compte que d'une faible part de la variabilité que ces derniers 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. Bien que conceptuellement séduisante, une telle démarche présente des difficultés qui en rendent l'application peu aisée.

Le principal défaut des méthodes croisées tient aux risques d'explosion combinatoire, risques d'autant plus élevés que le modèle est 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, REY-COYREHOURCQ et al. 2015 ; REY-COYREHOURCQ 2015), des logiques de recherche d'*optima* locaux (SCHMITT 2014 ; REUILLOU, SCHMITT et al. 2015) ou encore de recherche de motifs dans les sorties (CHÉREL, COTTINEAU et REUILLOU 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 quantitatifs de sortie sur lesquels les différents algorithmes pourront s'appuyer pour définir les valeurs de paramètres à échantillonner. De plus, l'exemple de

7. Voir par exemple les paramètres agissant de manière contre-intuitive, section 5.1.3.

l'exploration de l'espace des paramètres du modèle SimpopLocal (SCHMITT 2014) avec l'une de ces méthodes, « Calibration Profile » (REUILLOU, SCHMITT 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 me semble que ces méthodes sont strictement inapplicables en l'état actuel du modèle. Avec un important travail de réduction du nombre de paramètres, de quantification et de synthèse des indicateurs de sortie, elles pourraient apporter des connaissances intéressantes sur le modèle et aider à le rendre plus générique. Ce n'est toutefois pas la direction qui a été empruntée collectivement dans l'évolution du modèle jusqu'ici.

Par ailleurs, vu la complexité des données que ces méthodes peuvent produire, il serait à nouveau utile de mener des phases d'exploration et d'interprétation, notamment visuelles, de leurs résultats. En effet, 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 visuelles, ne serait-ce que sous la forme de *face validation*, pour en vérifier ou en comprendre les conclusions. Une plateforme telle que SIMEDB serait entièrement adaptée à l'exploration visuelle des sorties de telles analyses.

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* » (chapitre 3, figure 3.2) ou « *output validation* » (chapitre 3, figure 3.3). Dans le cas de SIMFEODAL, j'avais comme projet au début de ce travail de thèse de mener une confrontation, point par point, entre les nombreuses données archéologiques qui ont été compilées pour la Touraine (RODIER 2000, ZADORA-RIO 2008, par exemple) et les indicateurs correspondants du modèle. Très vite, j'ai 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 généricté bien moindre. Ces deux types de données présentent des degrés de précision trop différents pour être véritablement comparables.

Hors de la confrontation directe des sorties du modèle avec les données empiriques correspondantes, deux approches complémentaires (voir la figure 6.4) pourraient être intéressantes en perspective d'évaluation du modèle SIMFEODAL. 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).

8. Réduites à 15 jours de calcul en utilisant les possibilités de calcul distribué mises à disposition par l'infrastructure de calcul intensif EGI.

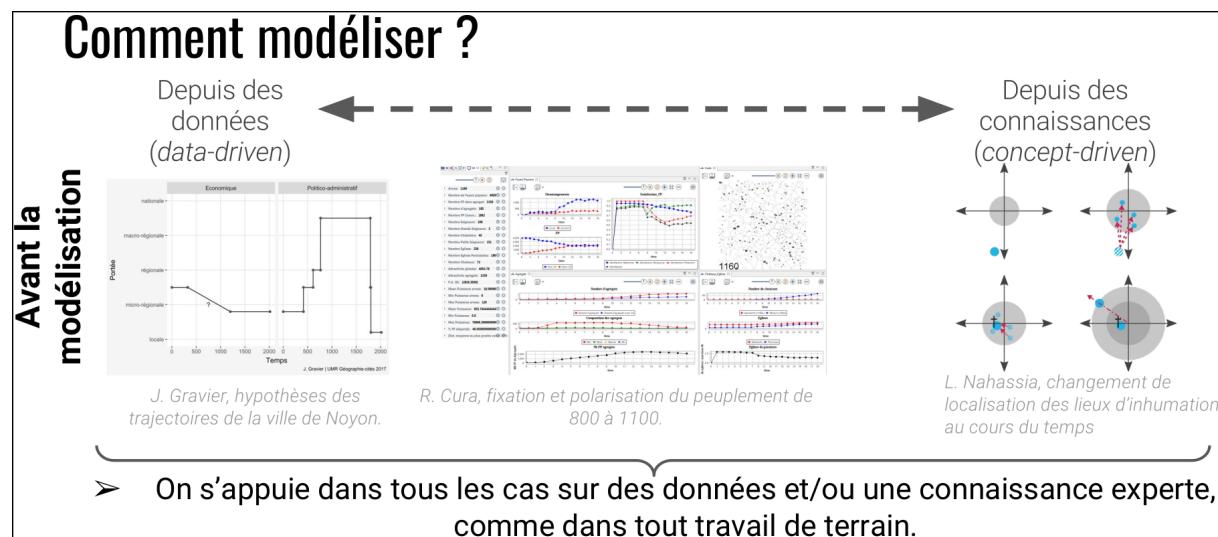


FIGURE 6.4 – Trois approches de modélisation différentes de processus sociaux et spatiaux sur le temps long (CURA, GRAVIER et NAHASSIA 2017).

Dans le cadre de sa thèse dédiée à l'étude d'une ville, Noyon, inscrite dans un système de villes sur la totalité de ses 2000 ans d'existence, GRAVIER (2018) prend appui sur la constitution de bases de données harmonisées, d'une résolution très fine et tendant vers l'exhaustivité. Dans son chapitre 6 (*ibid.*, pp.231–295), l'auteure mobilise ces données afin d'estimer statistiquement, entre autre, l'importance relative de différents lieux au regard de leurs relations et interactions. La variété des sources archéologiques et historiques est importante, mais elle est au service d'une seule question thématique. Ainsi, la diversité thématique des données est assez restreinte. L'étendue spatiale et temporelle 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.

Pour appliquer cette approche à SIMFEODAL, il s'agirait donc d'aller vers la constitution de bases de données cherchant l'exhaustivité et la précision sur des questionnements plus restreints : 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, comme l'évolution de la distance moyenne à l'église paroissiale la plus proche. 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.

NAHASSIA (2019), quant à elle, étudie dans sa thèse les formes spatiales et temporelles du changement sur la longue durée, à partir du cas de Tours. La partie 3 (*ibid.*, pp. 239–394) de cette thèse est notamment consacrée à une modélisation graphique des changements de localisation des activités intra-urbaines au cours du temps. Ces modèles graphiques sont évalués en confrontant les hypothèses théoriques aux riches données dont elle dispose pour la ville de Tours. Les hypothèses théoriques de l'auteure sont extrêmement générales, et pour les éprouver, elle choisit d'étudier une large diversité de dimensions socio-spatiales tout en réduisant l'amplitude de l'espace étudié à une ville.

En nous inspirant de cette approche, nous pourrions 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, REVILLA et al. 2005 ; GRIMM et RAILSBACK 2012) (voir section 3.1.1), 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 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 toute la région et toute la période étudiées. 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 l'on cherche à ce que les « rétro-prédictions » correspondent 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, je présentais 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 conséquents de valeurs de paramètres 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, etc.).

Les scénarios que nous mentionnons ici et qui pourraient 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. En effet, SIMFEODAL est un modèle qui se veut générique à l'Europe du Nord-Ouest, mais qui 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 considérer que SIMFEODAL réussit à reproduire les faits stylisés recherchés de manière plus robuste qu'initialement. Par exemple, on sait que les faits stylisés modélisés dans SIMFEODAL sont génériques à l'Europe du Nord-Ouest, mais selon des rythmes et des proportions potentiellement propres à chaque région. Si l'on prend le cas d'un diocèse montagnard, on pourrait alors diminuer les différents seuils de distance paramétrés selon des connaissances d'experts pour tenir compte du relief plus difficile à franchir, aboutissant à des temps de parcours plus importants. Aboutirait-on à une concentration des foyers paysans plus lente et moins nette ou, au contraire, est-ce que ce processus

serait accéléré et accentué ? En travaillant avec des spécialistes de l'histoire de ces régions, on pourrait ainsi tester la validité des hypothèses du modèle sur leurs propres terrains d'expertise.

A posteriori de ce travail, un séminaire visant 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, etc.), est d'ailleurs déjà prévu. Là encore, pour le dialogue interdisciplinaire et inter-régional, l'utilisation, grâce à SIMEDB, de représentations graphiques interactives comme interface entre les chercheurs présentera sans doute les avantages discutés dans ce travail de thèse.

6.1.4 Conclusion : Pour un recours systématique à la visualisation dans l'analyse de modèles

Dans cette partie, je suis revenu sur les bénéfices que l'analyse exploratoire visuelle 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 conforte l'idée que la modélisation pourrait profiter d'un recours plus systématique à l'analyse visuelle des données produites. Cela me 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. On ne peut toutefois, parallèlement, que constater la faiblesse de la production (carto)graphique dans le domaine de la modélisation (CURA 2020, à paraître, Introduction), alors même que les plateformes de simulation multi-agents rivalisent de possibilités en ce sens.

Nous l'avons vu, la visualisation peut aider le modélisateur et les spécialistes thématiques qui l'entourent tout au long du cycle de développement d'un modèle : 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, etc.) ; 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). En cela les modélisateurs auraient, il nous semble, tout intérêt à s'emparer de la question de la visualisation.

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, ces dernières gagneraient aussi à pourvoir aux problématiques propres aux données issues des modèles de simulation géographiques qui ont été esquissées ici (section 6.1.1). Pour reprendre 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.

6.2 Retours sur la co-construction d'un modèle de simulation descriptif

Tout au long de ce travail de thèse, nous avons choisi de tenir un positionnement réellement collectif et collaboratif. Nous souhaitions, comme annoncé dans le chapitre 1, co-construire un modèle plutôt que 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, préalablement au début formel de ce travail de thèse. Ce travail de modélisation n'est d'ailleurs 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 le modèle SIMFEODAL et la démarche qui en a animé la construction, l'évaluation et l'utilisation. 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. Le retour d'expérience que constitue ce travail de thèse s'est relativement affranchi d'une présentation chronologique des différentes étapes de développement du modèle. Pour autant, il me semble nécessaire ici de dresser un bilan réflexif revenant sur les conditions souhaitées de construction du modèle SIMFEODAL au regard de celles qui se sont concrètement réalisées.

Dans le chapitre 1 (section 1.4.1), j'ai présenté l'approche ComMod (Modélisation d'accompagnement) en identifiant les différences avec la démarche que nous souhaitions mener dans cette expérience de modélisation collective. Les points de divergence présumés étaient, d'une part, la volonté forte d'aller jusqu'au modèle implémenté dans notre projet, ce qui n'est pas systématiquement fait dans l'approche ComMod et, d'autre part, la séparation entre « animateurs » et « participants » dans l'approche ComMod, qui correspond à une distinction des rôles que nous souhaitions effacer dans un processus de co-construction. Dans cette partie, je reviens sur ces deux points de divergence présumés pour discuter de leur validité réelle, « *a posteriori* » de l'expérience de co-construction de modèle. Enfin, dans un retour sur les deux premiers chapitres, qui présentaient SIMFEODAL comme un modèle exploratoire et descriptif et justifiaient ce choix, je discute la position effective du modèle. Ce sera l'occasion de revenir sur l'évolution de cette position au cours des différentes versions du modèle et donc d'appréhender quelle a été la trajectoire de SIMFEODAL jusqu'ici.

6.2.1 Un retour d'expérience critique sur l'usage de modèles de simulation descriptifs : les limites de l'implémentation

L'expérience constituée par ces nombreuses années de travail sur le modèle SIMFEODAL a été enrichissante sur tous les plans, mais ce retour d'expérience est aussi l'occasion de pointer certains obstacles rencontrés, parfois non surmontés, quant à l'utilisation effective du modèle de simulation. Dès le départ, nous avions fixé un rôle exploratoire au modèle, en en faisant avant tout un support à la pensée. Nous avions toutefois l'ambition de pouvoir tester les hypothèses thématiques, non pas pour les (in)valider, mais pour être en mesure de vérifier s'il était possible que ces hypothèses puissent être nécessaires et suffisantes pour reproduire les processus empiriques étudiés.

Quel usage pour un modèle de simulation descriptif et exploratoire ? Aujourd’hui, il me semble que cette ambition n’est pas entièrement – ou pas encore – satisfaite. Un premier problème, commun à tous les types de modèle, est celui de l’équifinalité – bien conceptualisé notamment dans le domaine de la simulation en archéologie (PREMO 2010). Comme indiqué dans REY-COYREHOURCQ et al. (2017, p. 415), l’équifinalité « désigne de façon générale la possibilité d’obtenir, pour un système ouvert, un état final identique en suivant des trajectoires et des conditions initiales variées. Cela signifie dans le cas d’un modèle de simulation que des jeux d’hypothèses ou de paramètres différents peuvent mener à des résultats identiques ». Quel que soit le mode et la qualité de « validation » d’un modèle, celui-ci ne constituera jamais plus et au mieux qu’un « candidat à l’explication ».

Dans le cas des modèles descriptifs ou exploratoires, fondés sur de très nombreux mécanismes, il me semble que ce dernier constat est renforcé. En effet, dans un modèle, chaque mécanisme peut être conçu, puis implémenté de plusieurs manières. En multipliant les mécanismes, on augmente d’autant le nombre de solutions alternatives possibles, et on augmente exponentiellement le nombre de combinaisons potentielles résultant de ces alternatives possibles. Dans un modèle statistique, à mesure que l’on ajoute des variables, on augmente presque mécaniquement l’ajustement global du modèle aux données étudiées. Même sans ajouter de variables explicatives, on peut aussi renforcer l’ajustement d’un modèle quelconque en en complexifiant la formulation. Par exemple, pour une même série de point que l’on chercherait à décrire par une régression polynomiale, plus le degré de ce polynôme augmente, plus l’ajustement est amélioré lui aussi. Est-ce pour autant, dans le cas de points corrélés plutôt linéairement (voir figure 6.5), que la variable explicative est plus valide, sur un plan thématique, qu’avec une régression polynomiale de degré 1, c'est-à-dire une régression linéaire ?

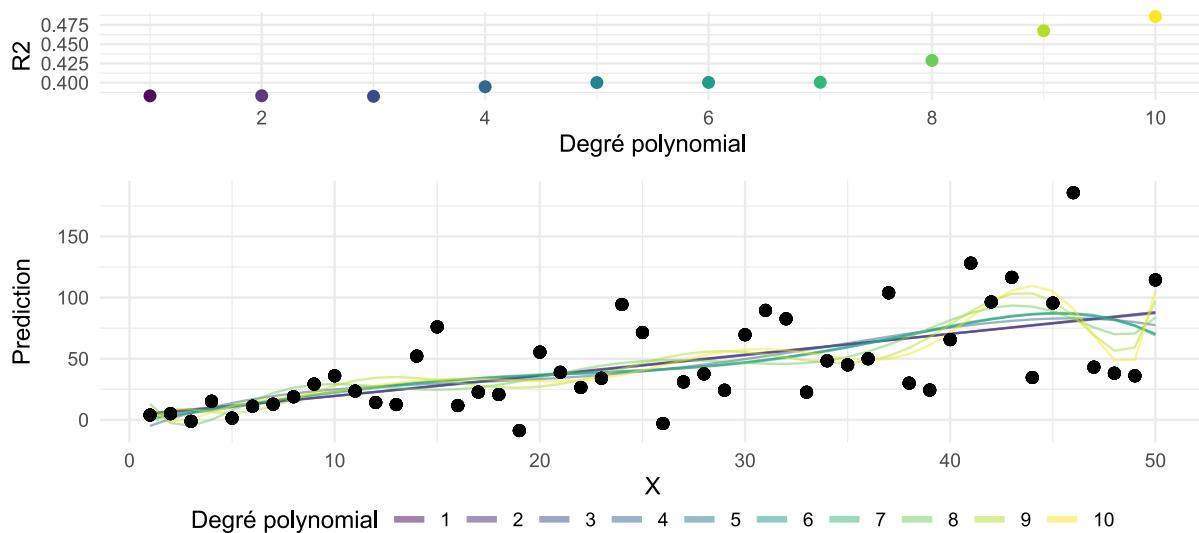


FIGURE 6.5 – Un exemple de sur-ajustement d’une série de points avec l’augmentation du degré d’une suite de régressions polynomiales.

Dans un modèle très stylisé où seuls quelques mécanismes sont présents, on est capable d'affirmer que la conjonction de ces mécanismes est un candidat potentiel à l'explication, voire d'éliminer d'autres candidats potentiels à l'explication, par exemple, avec le principe de parcimonie. Dans un modèle plus descriptif, l'accumulation de choix de mécanismes et de leurs interactions, difficiles à maîtriser, me semble rendre plus

difficile cette affirmation. Dans l'exemple de SIMFEODAL, on cherchait à pouvoir affirmer que la polarisation et la hiérarchie du système de peuplement pouvaient être expliquées par des dynamiques liées à l'émission des pouvoirs, l'augmentation de la violence et l'augmentation de l'encadrement religieux. Dans l'état actuel du modèle, le risque est que ce soit la somme des choix spécifiques liés aux modes d'interactions entre les mécanismes qui aboutissent en un modèle dont les résultats sont satisfaisants, tandis que les mêmes mécanismes, agencés différemment, aboutiraient peut-être à des résultats très différents.

Validité interne d'un modèle complexe. Ce constat est accentué par la nature complexe (en termes de complexité algorithmique) de l'implémentation informatique, qui en rend nécessairement l'évaluation interne plus difficile. Avec un modèle composé de plusieurs dizaines de mécanismes et donc de quelques milliers de lignes de code comme SIMFEODAL, le risque d'erreur – méthodologique ou technique – est infinitiment plus important que sur un modèle-jouet composé de quelques mécanismes et de quelques dizaines de lignes de code. Lors du paramétrage de SIMFEODAL, de très nombreuses erreurs ont été détectées et corrigées : parfois le code ne correspondait pas au mécanisme tel qu'il avait été défini, parfois le choix de telle ou telle fonction informatique ne rentrait pas le résultat décrit dans la documentation de la plateforme de simulation (GAMA), parfois un mécanisme du modèle était court-circuité par un autre (informatiquement ou conceptuellement), etc. Il est habituel, et presque attendu, qu'un programme informatique contienne des erreurs ou *bugs*, mais en complexifiant ce programme, on augmente fortement ce risque d'erreur.

Ces erreurs sont le plus souvent de la responsabilité de ceux qui implémentent le modèle, mais parfois, elles dépendent aussi d'éléments difficiles à contrôler, telle que la présence d'erreurs au sein même des outils utilisés pour mener la modélisation. C'est un risque inhérent à l'utilisation de plateformes de modélisation « de recherche » : les développeurs de ces outils sont tout autant susceptibles de commettre des erreurs d'implémentation que les modélisateurs. Ils en commettent sans doute proportionnellement moins qu'un non-informaticien, mais la complexité du code n'est pas du même ordre de grandeur non plus. La plateforme de simulation GAMA, par exemple, repose sur plus de 500 000 lignes de code. Parmi celles-ci, la probabilité qu'il n'y ait aucune erreur est quasi-nulle, en dépit des très nombreux et réguliers *commits* qui viennent, justement, corriger ces *bugs*. Une bonne partie de ces *bugs* sont en fait peu dommageables dans le cas de SIMFEODAL, parce qu'ils portent sur des fonctions non utilisées, ou sur des conjonctions de cas non rencontrés dans le modèle. Cependant, une erreur importante concernant l'ordonnancement des agents a été détectée et corrigée sur la plateforme GAMA en mai 2016, dont la version était alors jugée stable (version 1.7). Cette erreur, survenue entre les versions 3 et 4 de SIMFEODAL (voir chapitre 3, tableau 3.1) a eu des conséquences majeures sur les résultats du modèle, et une large partie des expériences réalisées précédemment à la correction de ce bug a du être ré-exécutée pour en vérifier les sorties une fois le bug corrigé.

Dans une perspective thématique, où l'on cherche à tester des hypothèses, un modèle descriptif est alors moins robuste qu'un modèle KISS. C'est autant vrai pour l'aspect conceptuel – la multiplicité des interactions entre mécanismes étant difficilement

contrôlable – que pour l'aspect informatique où les risques d'erreurs sont multipliés. Lors du passage du modèle conceptuel au modèle implémenté, il y a de fortes chances que des erreurs des modélisateurs viennent invalider les résultats thématiques proposés grâce au modèle. Même dans un modèle parfaitement implémenté, l'équifinalité conceptuelle, les choix techniques d'implémentation, ou encore les potentielles erreurs des plateformes logicielles utilisées peuvent restreindre la qualité démonstrative du modèle : ce ne sont pas les hypothèses conceptuelles, seules, intégrées dans le modèle qui pourront constituer des candidats à l'explication thématique mais les hypothèses telles qu'elles ont été construites et formalisées dans le modèle implémenté.

De l'importance de l'implémentation. Dans le cadre d'une démarche collective de modélisation, ces quelques limites, inhérentes au choix d'une modélisation informatique de type descriptive, ne sont toutefois pas véritablement gênantes au vu des nombreux atouts de ce type de démarche – introduits dans le chapitre 1. L'implémentation informatique du modèle a nettement renforcé le besoin d'explicitation des hypothèses introduites. Plus le formalisme employé est précis et non ambigu (ce qui est le cas des formalismes informatiques et non des modèles « rhétoriques » ou « graphiques » évoqués dans l'Introduction générale), plus leur utilisation force à préciser et à expliciter la conceptualisation du modèle. En allant jusqu'à l'implémentation informatique, nous avons collectivement été amenés à trancher des centaines de choix, à expliciter à de multiples reprises le contenu de chacun des nombreux mécanismes, et donc à élaborer, ensemble, une compréhension partagée de ce modèle pour la totalité des domaines qui le caractérisent. De plus, un modèle de simulation descriptif est un outil dont la multiplicité des composantes (mécanismes, agents, interactions entre mécanismes, etc.) favorise l'exécution d'incessantes modifications, que ce soient des corrections ou des améliorations. La correction de chaque erreur conceptuelle est l'occasion de re-vérifier (au sens d'une validation interne) la cohérence d'ensemble des composantes du modèle. Chaque bug informatique corrigé dans une fonction du modèle implémenté permet de vérifier le bon fonctionnement et la robustesse des autres fonctions. Les rapports d'erreur, au niveau de la plateforme de simulation, donnent l'occasion d'améliorer le code du modèle en le rendant plus robuste. Chacune de ces erreurs, mais aussi chacune des améliorations localisées qui sont appliquées au modèle, permettent ainsi de revoir la cohérence du modèle dans sa globalité. Toutes ces interventions sur le modèle, conceptuelles autant qu'informatiques, contribuent à renforcer progressivement la confiance que l'on peut lui accorder thématiquement. Un modèle « entretenu régulièrement » comme SIMFEODAL constitue ainsi un support à la discussion dont la « durée de vie » me paraît supérieure à celle d'un modèle plus simple, parce que les possibilités de reprises et de raffinement sont nombreuses.

6.2.2 Quelle part effective du collectif dans la conception et l'implémentation du modèle ?

Tout au long du manuscrit de cette thèse, j'ai insisté sur la dimension collective de co-construction qui a permis d'aboutir au modèle SIMFEODAL. On pourrait objecter, au regard des *commits* du modèle, que seules deux personnes ont effectivement apporté des modifications dans le dépôt logiciel. En regardant plus en détail l'historique de ce

dépôt, on pourrait même constater que Cécile TANNIER, l'autre contributrice du dépôt, n'est intervenue « que » dans de nombreuses modifications de la documentation du modèle. Le code-source de SIMFEODAL n'a donc été implémenté, en tant que tel, que par moi.

Cela signifie-t-il pour autant que la volonté de co-construction globale, du modèle conceptuel jusqu'au modèle implémenté, n'a finalement pas été entièrement effective ? Avant de répondre à cette question, je crois important d'expliquer la décision de cette implémentation mono-participante, qui pourrait largement accréditer la distinction entre « participant » et « animateur » (ou « implémenteur », voir chapitre 1, section 1.4.1).

Compétences spécifiques nécessaires pour l'implémentation d'un modèle de simulation. Le développement informatique d'un modèle de simulation demande des compétences particulières. En premier lieu, des compétences méthodologiques, relatives à la capacité à transcrire sous forme algorithmique les mécanismes et interactions exprimés dans un modèle conceptuel. Ces compétences sont l'une des caractéristiques attendues d'un « modélisateur », et assez répandues dans les sous-domaines quantitatifs des sciences humaines et sociales. En second lieu, le développement d'un modèle de simulation requiert des compétences techniques assez spécifiques et avancées. Les algorithmes et fonctions doivent en effet nécessairement être « implémentés » informatiquement, c'est-à-dire écrits, « développés », dans un langage de programmation, qui doit donc être maîtrisé par le modélisateur. Dans le monde de la simulation à base d'agents, les différentes plateformes disponibles mobilisent de nombreux langages de programmation. Dans une étude globale portant sur 24 plateformes, KRAVARI et BASSILIADES (2015) montrent ainsi que l'on retrouve 14 langages de programmation différents (*ibid.*, table 7, §4.3). Certains sont très génériques (Java, C/C++, Python, etc.), tandis que d'autres ont été créés spécifiquement pour la plateforme de simulation correspondante (langage Logo pour NetLogo, langage GAML pour GAMA, etc.).

Un modélisateur formé dans l'un de ces langages de programmation, et en particulier ceux spécifiques à la simulation multi-agents, aura indéniablement plus de facilités à en apprendre un autre. Cela demande tout de même un apprentissage conséquent, le plus souvent réalisé par auto-formation. SIMFEODAL a été développé sur la plateforme GAMA, en langage GAML, qu'aucun des membres du projet ne maîtrisait réellement. L'acquisition par tous les participants de la connaissance de ce langage aurait donc demandé un temps important d'apprentissage, pas nécessairement utile au regard de l'objectif du projet.

Des compétences à entretenir et à développer. En plus du coût temporel de formation initiale, l'utilisation d'une plateforme de simulation « de recherche » requiert aussi une formation continue puisque la plateforme sur laquelle le modèle est bâti évolue. Au cours du développement de SIMFEODAL, trois versions « majeures » successives de GAMA ont par exemple été utilisées (1.6, puis 1.7 et finalement 1.8). Chacune de ces versions apporte des améliorations qui permettent notamment de gagner en performance, en stabilité, ou de disposer de nouvelles fonctions qui permettent une meilleure expressivité du code. On peut faire le choix de construire le modèle à partir d'une seule

et unique version, quand bien même celle-ci serait obsolète au bout d'un moment, mais cela revient à négliger toutes ces améliorations. De plus, lorsque les nouvelles versions de la plateforme viennent corriger des erreurs latentes, ce qui est le cas de GAMA, il est essentiel de mettre à jour le logiciel. L'implémentation informatique d'un modèle dans ces conditions requiert donc un travail incessant de mise à jour, de correction et d'optimisation du code-source du modèle. Cela implique un coût temporel important de formation, de veille technologique, mais aussi de retours d'expériences aux développeurs de la plateforme, de rapports de *bug* (*issues*) et de demande d'améliorations (*enhancements*), sans même aborder le temps nécessaire à l'implémentation effective. Même si, dans notre groupe de travail, Cécile TANNIER s'est formée en GAMA pendant le développement de SIMFEODAL ou que Samuel LETURCQ a suivi des formations MAPS pour apprendre le Logo, leur participation effective à l'écriture du code de SIMFEODAL aurait demandé un temps important. Temps d'autant plus important si l'on considère que le développement collectif (par opposition au développement individuel) requiert encore d'autres compétences : maîtrise d'outils collaboratifs (versionnement collaboratif par exemple), bonne connaissance du langage pour comprendre le code développé par les autres, et plus encore pour en comprendre l'intention et la logique d'organisation... Ce dernier point est d'autant plus prégnant que le modèle est déjà, en lui-même, complexe : le temps nécessaire à la familiarisation à son code augmente.

Une construction effectivement collective. Pour autant, le développement collectif apporte un avantage indéniable en matière d'évaluation interne du modèle développé : en multipliant les points de vue sur le code, on multiplie d'autant les probabilités de débusquer les erreurs d'implémentation. Ces points de vue peuvent émaner de différentes personnes, mais aussi être suscités de la part d'un unique individu. C'est par exemple au fondement de la méthode de validation interne du « *rubber duck* » (*Méthode du canard en plastique* 2019), où l'on explique à un objet (un « canard en plastique » classiquement) son code en le commentant ligne par ligne. L'objectif de cette oralisation du code est de le présenter d'une autre manière, et par conséquent d'y repérer des erreurs qui auraient échappé à sa « lecture ».

Dans le cas de SIMFEODAL, et cela constitue un début de réponse à l'interrogation sur l'effectivité de la co-construction du modèle, nous avons bénéficié d'oreilles bien plus attentives qu'un canard en plastique auprès des participants au projet. Toutes les lignes de code correspondant aux mécanismes du modèle ont systématiquement été oralisées, explicitées et discutées, au moins par les deux « modélisateurs » du groupe. Au-delà de cette vérification, toute la conception algorithmique de ces mécanismes en elle-même a été réalisée collectivement, impliquant chacun en fonction de ses aptitudes, c'est-à-dire surtout les modélisateurs, mais avec une participation sensible des thématiciens, notamment en termes de validation ou d'arbitrage. La manière de concevoir et d'implémenter les mécanismes de SIMFEODAL résulte de décisions unanimes vis-à-vis de la meilleure manière de rendre compte des intuitions collectives, incluant autant les modélisateurs que les thématiciens.

Face à un modèle informatique, exprimé dans un formalisme qu'ils ne maîtrisent pas, les chercheurs dotés d'expertise thématique procurent une aide majeure en cas de doute entre des mécanismes alternatifs possibles par exemple. Ce sont en effet le plus souvent

eux qui ont tranché à partir de leur connaissance experte des phénomènes. Par ailleurs, comme dans la technique du *rubber duck*, les mécanismes leur ont tous été décrits de manière précise, c'est-à-dire en explicitant leur contenu à partir du code-source, que ce soit verbalement ou à l'aide de représentation graphiques (schémas, diagrammes d'activité, etc.). Ces pratiques ont contribué à la validation interne du modèle (explicitation et multiplication des points de vue) autant qu'à sa validation externe (par le jugement des thématiciens sur les détails d'implémentation du modèle). Notons enfin que l'influence des membres du projet qui n'ont pas participé aux dernières années de la modélisation de SIMFEODAL, l'archéologue Élisabeth LORANS et le « modélisateur-archéologue » Xavier RODIER, a été importante et est toujours visible dans certains choix d'implémentation de la version actuelle de SIMFEODAL (définition conceptuelle et algorithmique des agrégats notamment).

Un processus de co-construction inscrit dans la durée. Au regard de cette expérience, il me semble que la volonté de co-construire le modèle en impliquant chaque membre du projet lors de chacune de ses étapes a été relativement respectée. Comme expliqué dans le chapitre 1, les « thématiciens » ne sont pas devenus pour autant des experts en implémentation de modèle de simulation, et les « modélisateurs » n'ont pas acquis l'ensemble des compétences disciplinaires de leurs collègues. La recherche d'une posture – idéale – de « modélicien » (BANOS, in OURIACHI, MATHIAN et al. 2017, p. 484) n'est pas entièrement aboutie, mais le temps long de ce processus de modélisation collective a cependant permis à tous de participer à chacune des phases du projet. Les thématiciens, qui ne sont pas les simples « participants » comme dans l'approche Com-Mod, ont ainsi fortement contribué à la construction en tant que telle du modèle implanté, fournissant également de nombreux retours sur ce dernier. Il me semble que c'est justement ce temps long qui a permis la construction collective de SIMFEODAL, en laissant à chacun le temps de s'acclimater aux positions et demandes des autres.

L'implication collective sur le temps long, relativement au temps court et parfois urgent de certaines expériences de modélisation dans un contexte de recherche-action, a été facilitée par l'organisation très horizontale qui a toujours caractérisé notre groupe de travail, horizontalité rendue possible par l'usage avant tout exploratoire et heuristique du modèle. Il n'y avait ainsi ni sensibilisation à un aléa, ni besoin de conciliation entre des acteurs, mais simplement une curiosité scientifique sur l'importance qu'un modèle de simulation pourrait constituer comme support à la pensée d'un ensemble de processus sociaux inscrits dans l'espace et dans la durée. En cela, l'expérience SIMFEODAL a effectivement été – et continuera sans doute de l'être après le rendu de ce manuscrit – mue par une démarche de co-construction profondément exploratoire et abductive, les résultats et discussions intermédiaires guidant la suite de l'évolution du modèle.

6.2.3 La trajectoire du modèle SimFeodal

La démarche exploratoire qui a guidé la co-construction de SIMFEODAL a aussi entraîné une forte évolution du modèle. Dans le chapitre 3 (tableau 3.1), j'ai déjà présenté l'historique des versions du modèle, de même qu'une analyse quantitative rétrospective de son mode de progression méthodologique. Au-delà du modèle implanté, il me semble intéressant de revenir sur la matérialisation de cette démarche exploratoire, que

l'on peut retracer au travers de la matérialisation de l'évolution du modèle conceptuel, c'est-à-dire de sa trajectoire.

Référentiel de la trajectoire. Pour décrire une trajectoire, il faut définir deux éléments : un référentiel et un point d'origine. Comme référentiel, on peut utiliser le cadre du « fer à cheval », développé par BANOS et SANDERS (2012) et explicité par les mêmes auteurs l'année suivante (BANOS et SANDERS 2013). Ce cadre vise à la représentation des modèles et de leurs trajectoires dans un référentiel constitué de deux axes. L'axe des abscisses est un gradient du « niveau de simplification du modèle », s'étendant des modèles jugés « KISS », c'est-à-dire très simplifiés, jusqu'aux modèles « KIDS », peu simplifiés (*ibid.*, p. 840-841). L'axe des ordonnées correspond au « niveau d'abstraction du phénomène empirique que l'on cherche à modéliser », qui peut être résumé en « phénomène particulier ou fait stylisé » (*ibid.*, p. 839-840). Pour les auteurs, l'intersection de ces deux axes de description permet de positionner et de différencier les modèles de systèmes spatiaux.

Pour illustrer l'usage de ce référentiel, le travail de « modélographie » de SCHMITT et PUMAIN (2013) constitue un bon exemple. Dans cet article, les autrices décrivent et comparent six modèles multi-agents géographiques qui simulent des interactions entre des sociétés et leur environnement spatial. Chacun des modèles est présenté selon une grille de description commune¹⁰, et l'un des résultats est notamment constitué par une comparaison graphique des positions des modèles dans le référentiel du « fer à cheval » (figure 6.6).

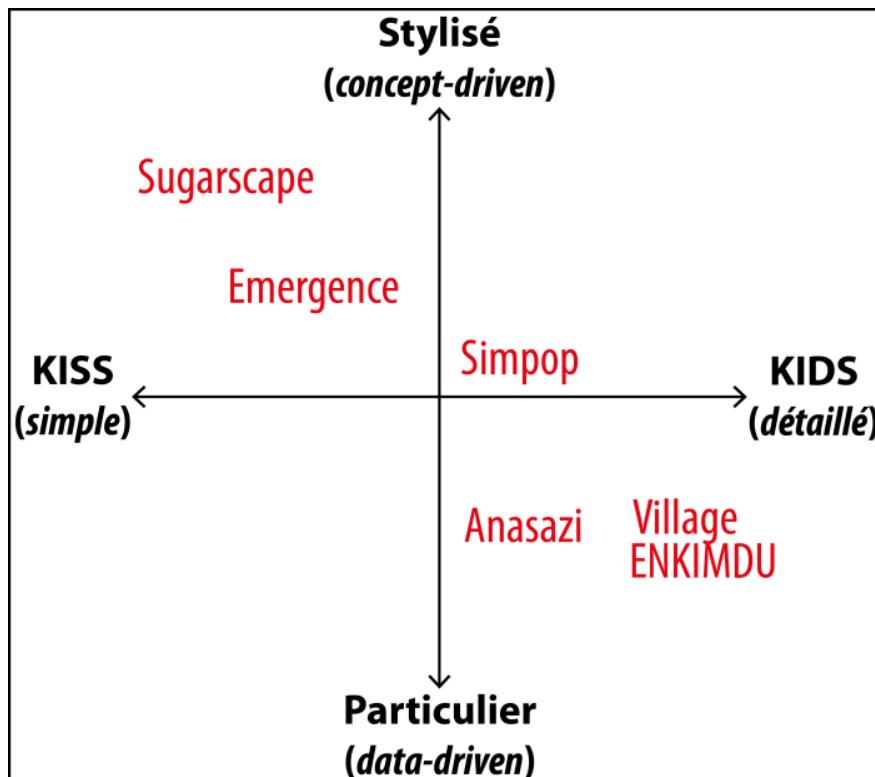


FIGURE 6.6 – Une « classification des approches de modélisation » de modèles géographiques, tirée de la « modélographie » SCHMITT et PUMAIN (2013, Figure 1).

10. Les autrices n'utilisent pas le formalisme ODD (SCHMITT et PUMAIN 2013, §5-6) et proposent une grille personnelle : « contexte de recherche », « enjeux de modélisation », « dynamiques simulées » et « sorties de simulations et résultats ».

Origine de la trajectoire. La définition du point d'origine d'un modèle dans ce référentiel est plus difficile car éminemment subjective. Selon le point de vue de celui qui positionne le modèle, qu'il participe ou non à sa construction, la position peut ainsi varier. On peut le montrer en s'appuyant sur un exercice qui avait réalisé à la fin du projet TransMonDyn, où un groupe de travail avait cherché à mener une « TransModélographie », c'est-à-dire une comparaison systématique des différents modèles construits au sein du projet. Pour mener ce travail, nous avions commencé par présenter notre démarche aux différents participants du projet, en proposant notamment une classification « naïve » des modèles de chacun (figure 6.7).

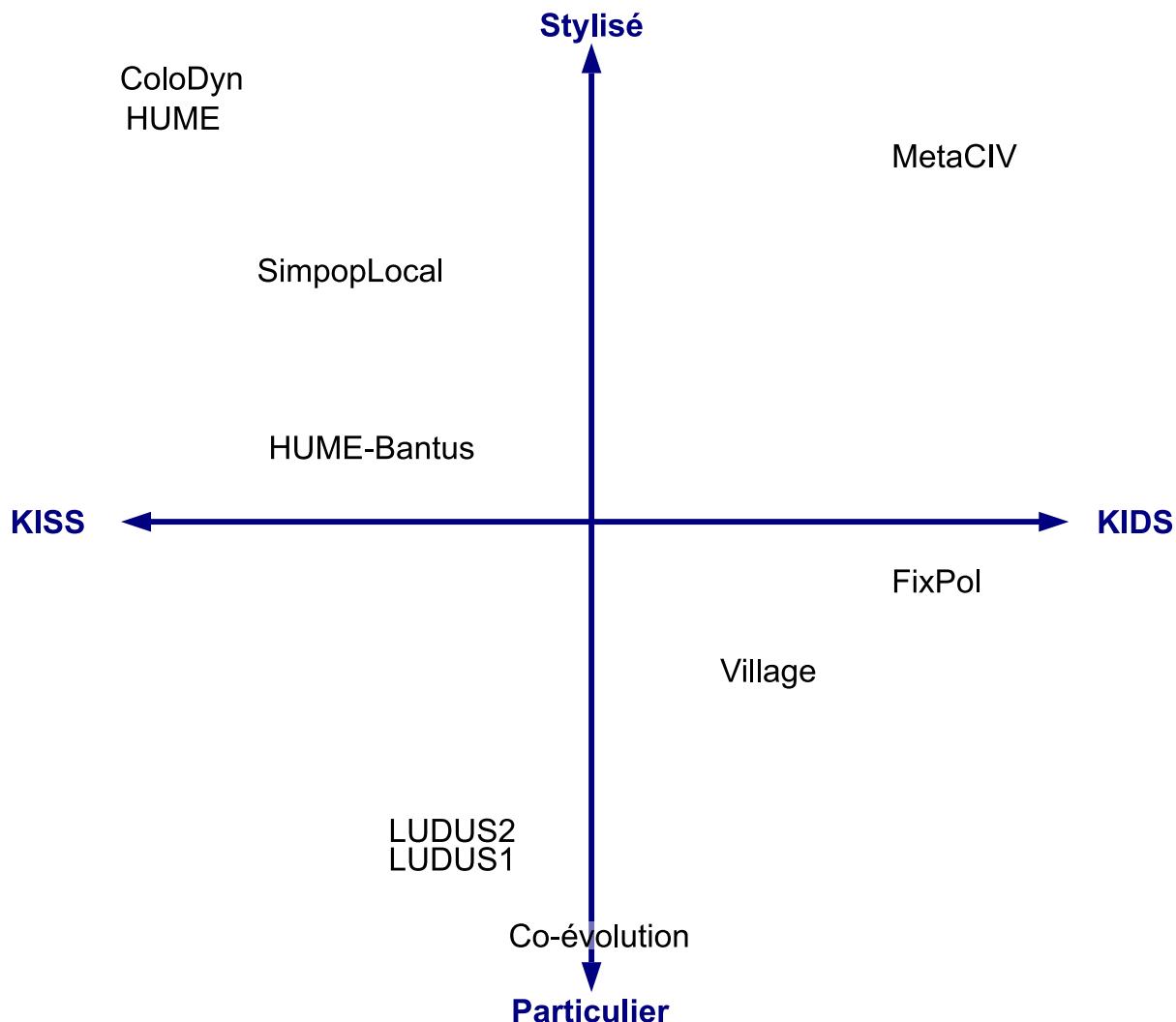


FIGURE 6.7 – Une proposition de « TransModélographie » des modèles conçus dans le cadre du projet TransMonDyn¹¹.

Figure issue d'une communication à un séminaire interne du projet TransMonDyn à Tours, Octobre 2014, par Robin CURA, Hélène MATHIAN et Clara SCHMITT.

N.B. : Le modèle « FixPol » (*fixation et polarisation*) est un ancien nom de SIMFEODAL.

11. Ces modèles sont décrits dans l'ouvrage collectif du projet (SANDERS 2017), et correspondent aux transitions énumérées dans le chapitre 1 (tableau 1.1) : HUME, transition 1 (COUPÉ et al. 2017a); HUME-Bantus, transition 2 (COUPÉ et al. 2017b); Village, transition 3 (KOHLER et CRABTREE 2017); SimpopLocal, transition 4 (PUMAIN, SCHMITT et REY-COYREHOURCQ 2017); MetaCIV, transition 5 (NUNINGER, GARMY et al. 2017); LUDUS1 et LUDUS2, transition 6 (OURIACHI, BERTONCELLO et FRANC 2017); Co-évolution, transition 9 (BRETAGNOLLE et FRANC 2017); ColoDyn, modèle pédagogique (BANOS, LE NÉCHET et al. 2017).

À la suite de cette présentation, nous avions demandé aux participants de remplir un questionnaire visant à décrire selon leur point de vue la position du modèle auquel ils participaient. Faute de temps, ce projet n'a pas pu être mené à son terme, mais suite au dépouillement des premières réponses, nous avions noté la forte hétérogénéité des descriptions d'un même modèle, selon le rôle de l'intervenant (thématicien, modéliste), mais aussi une hétérogénéité parmi les différents tenants d'un même rôle au sein d'un même modèle. Les modèles ne changeaient pas réellement de cadran, mais en leur sein, la position déclarée par chacun variait fortement.

La définition du point d'origine de la trajectoire de SIMFEODAL est donc très subjective. Par cohérence, je repartirai de la position affectée lors de cette expérience de « TransModélographie », qui est celle d'un modèle résolument KIDS mais situé dans un entre-deux entre le particulier et le stylisé (voir la position du modèle FixPol dans la figure 6.7).

Qualifier la trajectoire de SimFeodal : l'exemple de la modélisation des seigneurs. Au même titre qu'il est difficile de définir le point d'origine du modèle, la caractérisation de sa trajectoire est un exercice délicat. En effet, un modèle peut présenter des composantes hétérogènes, c'est-à-dire que la description de tel mécanisme peut être très détaillée tandis que celle d'un autre sera plus simple. De même, le comportement d'un type d'agent peut être très stylisé quand celui d'un autre sera entièrement guidé par des données.

Dans le cas de SIMFEODAL, je prendrai l'exemple d'un mécanisme qui a fortement évolué durant le cycle de vie du modèle et a occupé une large part des discussions collectives, à savoir la modélisation des seigneurs, et notamment les mécanismes liés à la mise en place de réseaux de lignages seigneuriaux. Lors de la réalisation du modèle conceptuel (illustré dans TANNIER et al. (2014, fig. 13.1, p. 297)), il avait été décidé de différencier les seigneurs laïcs des seigneurs monastiques, dont on sait que les logiques de constitution de lignages par le patrimoine, le don et la vassalité diffèrent.

Origine - Étape 1. Dans les premières versions du modèle implémenté, il y avait des agents de type « seigneur laïque », dotés de mécanismes proches de ceux des « seigneurs » dans le modèle actuel. Les agents « seigneurs monastiques » étaient prévus mais nous avions décidé de commencer l'implémentation de manière incrémentale, en privilégiant d'abord d'autres agents.

Étape 2. Au fur et à mesure du développement du modèle, alors que certains types d'agents voyaient leurs mécanismes se complexifier dans une logique itérative, le modèle a atteint un premier stade de maturité et produit des résultats prometteurs. Il a alors été choisi, par les thématiciens notamment, de délaisser la distinction entre seigneurs laïcs et seigneurs monastiques, ces derniers étant moins nombreux et moins représentatifs de la période. Les seigneurs monastiques ont donc été retirés du modèle conceptuel, qui n'a plus alors distingué que des « seigneurs », sans particularisation de type. SIMFEODAL a ainsi progressé sur l'axe particulier-stylisé, en s'approchant d'une situation plus intermédiaire.

Étape 3. Quelques versions plus tard, tandis que les dynamiques reproduites par le modèle devenaient plus satisfaisantes, nous avons voulu re-complexifier les mécanismes liés aux seigneurs. La dynamique de polarisation produite par le modèle était satisfaisante vis-à-vis des connaissances expertes, mais la hiérarchie des châteaux et des seigneurs était trop uniforme. Pour faire apparaître une hiérarchisation plus forte entre les seigneurs et, surtout, pouvoir mieux l'observer, nous avons, d'une part, ajouté des indicateurs de sortie relatifs à la vassalité des seigneurs et, d'autre part, adapté les mécanismes de dons de zones de prélèvement et de châteaux. L'objectif était de modéliser le comportement empirique des seigneurs qui distribuaient une partie de leurs possessions à des seigneurs de moindre importance en échange de loyauté – et donc de modéliser la mise en place de liens de vassalité. De plus, pour que les réseaux de vassalité constitués aient une cohérence empirique, les seigneurs vérifiaient les liens des récipiendaires potentiels des dons : étaient écartés tous les petits seigneurs ayant, par succession de liens, des relations avec un autre grand seigneur. Les lignages seigneuriaux prenaient ainsi la forme de deux arbres hiérarchiques dont la tête était occupée par chacun des deux grands seigneurs concurrents du modèle (voir chapitre 2, section 2.3.1). Avec les graphes constitués par ces arbres, nous pouvions alors mesurer leurs degrés, leurs diamètres, la somme des puissances des seigneurs, etc. Par ces modifications, la position du modèle a été particularisée (axe Stylisé-Particulier) et complexifiée (axe KISS-KIDS).

Étape 4. Notre attention s'est ensuite portée à nouveau sur la polarisation et la hiérarchisation du peuplement, notamment en introduisant le concept de l'agent « pôle d'attraction », composé d'agents attracteurs, qui permettait de réduire la complexité du modèle via ce type d'agent générique alors que dans les versions précédentes du modèle, chaque type d'attracteur avait ses propres logiques. Ce faisant, nous avons accordé de moins en moins d'intérêt à l'évaluation visuelle de ces lignages seigneuriaux, jusqu'à ce qu'ils ne soient plus jamais pris en compte dans l'évaluation. Pour acter cette évolution, dans la version 6 de SIMFEODAL (voir chapitre 3, tableau 3.1), les thématiques ont d'eux-mêmes suggéré de supprimer toute logique de constitution de réseau de vassalité : les dons des seigneurs sont désormais, comme décrit dans le chapitre 2 (section 2.3.10), effectués sans aucune distinction d'appartenance à un réseau seigneurial. C'est maintenant une logique plus spatiale, liée à la distance entre les petits seigneurs, qui conditionne les potentiels récipiendaires de dons. Cette suppression a inversé l'évolution du modèle vis-à-vis de son mouvement précédent dans le référentiel du fer à cheval : le modèle redevenait plus stylisé et moins descriptif. Le modèle devenait même plus stylisé et simple qu'il ne l'avait jamais été au cours de sa construction par rapport aux mécanismes liés aux seigneurs.

La figure 6.8 reprend graphiquement ces étapes, qui sont spécifiques au cas de la modélisation des seigneurs, mais permettent toutefois d'illustrer plus généralement la trajectoire d'ensemble du modèle SIMFEODAL. En premier lieu, on peut noter que cette trajectoire ne s'inscrit pas dans les formes « en fer à cheval » présentées par BANOS et SANDERS (2013) : les étapes intermédiaires ont « déplacé » le modèle dans potentiellement toutes les directions, sans respecter une forme spécifique. En second lieu, remarquons que SIMFEODAL, présenté depuis l'Introduction générale comme un mo-

dèle descriptif et exploratoire, est actuellement (étape 4 dans la figure 6.8) dans une position intermédiaire, entre le KISS et le KIDS, au moins pour ces mécanismes liés aux seigneurs.

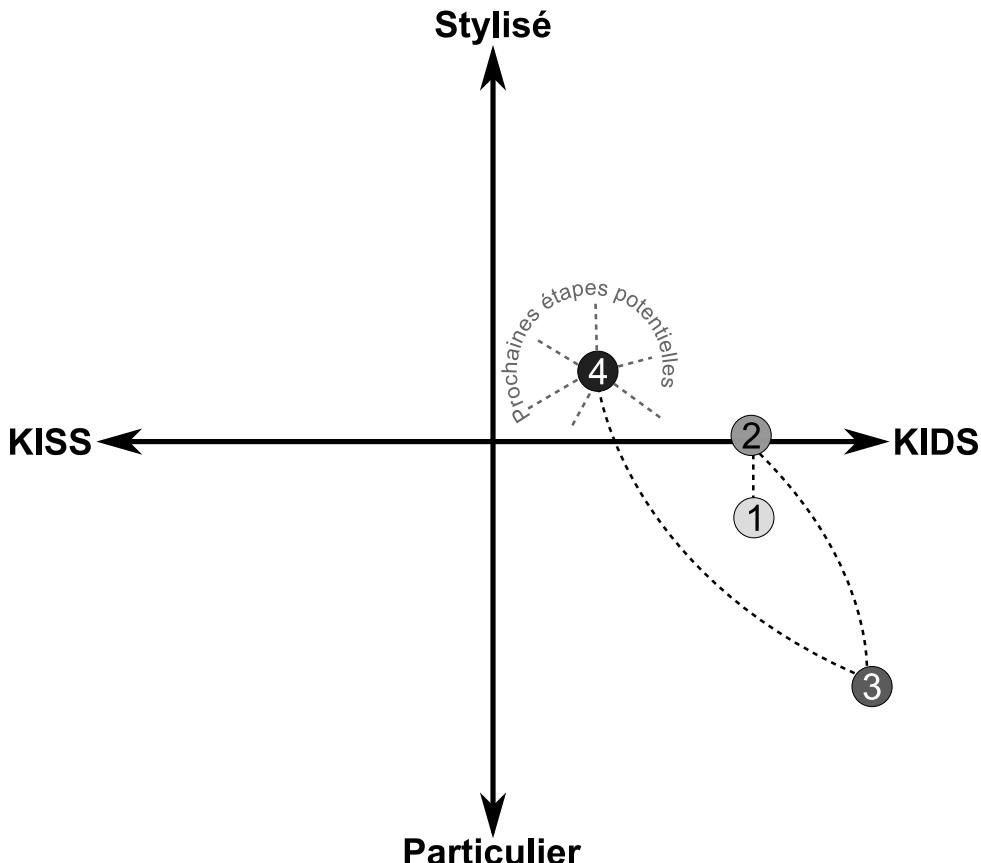


FIGURE 6.8 – La trajectoire du modèle SIMFEODAL, dans le « fer à cheval » de BANOS et SANDERS (2013).

N.B. : cette trajectoire correspond à la position des mécanismes liés aux seigneurs dans le modèle.

Il me semble que ces deux éléments peuvent s'expliquer par la nature de SIMFEODAL et de sa co-construction, qui sont plus exploratoires et abductives que véritablement descriptives. En témoignent les allers-retours fréquents entre augmentation et diminution de la complexité (axe KISS-KIDS) dans l'historique de développement du modèle. Une partie de ces évolutions sont prévues dans la démarche KIDS (EDMONDS et MOSS 2005), qui débute par un modèle « complexe », descriptif, qui sera ensuite progressivement simplifié si cela n'en diminue pas l'utilité. La « simplification » de SIMFEODAL s'inscrit dans cette démarche. La complexification de certains agents et mécanismes va pourtant à l'encontre de cette logique, et a posteriori, j'aurais tendance à ne caractériser SIMFEODAL que comme un modèle exploratoire, sans le positionner uniquement sur l'axe KISS-KIDS, sinon en explicitant qu'il s'inscrit au départ dans un positionnement descriptif dont on a ensuite accepté de réduire la complexité.

Ce sont avant tout les envies du groupe de travail qui guident le développement du modèle, influencées par les résultats successifs du modèle et par leur exploration. Ces envies varient, s'accompagnent d'abandon de questionnements initiaux et de nouvelles questions, évoluant parfois en sens inverse des choix passés, voire correspondant à de véritables « retours en arrière » comme dans le cas des lignages seigneuriaux, abandonnés après avoir été très spécifiés. La forme irrégulière de la trajectoire de SIMFEODAL peut interroger de prime abord, mais résulte en fait des multiples interactions entre

les concepteurs du modèle et n'est que la matérialisation du processus abductif qui a guidé la co-construction de SIMFEODAL.

6.2.4 Conclusion : Modéliser avec et pour les autres.

Dans cette sous-partie nous avons montré que le modèle, en tant qu'outil informatique, a davantage constitué un support à la discussion interdisciplinaire et à l'explicitation des hypothèses et connaissances qu'à seulement évaluer la capacité de ces hypothèses à reproduire les dynamiques empiriques de polarisation, de hiérarchisation et de fixation du peuplement. La construction de SIMFEODAL n'a pas été transdisciplinaire : tous les participants n'ont pas également contribué à toutes les tâches de modélisation. Au contraire, la vision interdisciplinaire souhaitée initialement a été conservée, dans le sens où les connaissances et compétences propres de chacun des participants ont été mutualisées pour les tâches qui y correspondaient le mieux. De la même manière qu'on ne peut acquérir une connaissance thématique approfondie d'un sujet complètement inconnu en quelques années, on ne peut pas non plus y acquérir les compétences techniques avancées nécessaires à l'implémentation de modèles de simulation complexes et détaillés.

Pour autant, je crois qu'on peut tout de même caractériser cette construction interdisciplinaire et collective comme une co-construction, car chacun est intervenu sur chacune des étapes de la construction et de l'évaluation du modèle. Il résulte de cette co-construction un modèle à la trajectoire irrégulière, faite de fréquents allers-retours, et au positionnement final difficile à caractériser dans des référentiels existants (BANOS et SANDERS 2013) tant ses composantes sont hétérogènes. Cette trajectoire particulière me semble inhérente au mode de co-construction, résolument exploratoire et à but heuristique qui a été collectivement choisi et mis en œuvre.

La satisfaction collective qui ressort de cette expérience de modélisation me paraît due à des facteurs individuels autant que collectifs. Individuellement, chacun a voulu s'inscrire pleinement dans cette expérience interdisciplinaire et a accepté de passer outre ses habitudes disciplinaires. Collectivement, c'est le choix d'une organisation horizontale, bâtie sur un temps long de plusieurs années autour des complémentarités de pratiques et de connaissances, qui a permis à ce projet d'aboutir.

Conclusion

Ce chapitre a présenté deux retours réflexifs, assez isolés au premier regard, sur la spécificité de l'exploration de données de simulation et sur les modalités du processus de co-construction mis en œuvre dans le cadre de la construction et de l'évaluation de SIM-FEODAL. Chacune de ces sous-parties a déjà donné lieu à une conclusion intermédiaire, et je ne reviendrai ici que sur leur complémentarité.

Que ce soit sur le plan méthodologique de l'exploration de données issues de simulation, ou sur le plan conceptuel de la construction de modèle, l'élaboration d'une démarche exploratoire, faite d'allers-retours entre la conception et l'évaluation, entre la visualisation et l'implémentation, ressort comme un moyen fonctionnel de favoriser l'interdisciplinarité. Cette démarche peut pour cela être bâtie autour d'un objet commun – car partagé – et positionné à l'interface entre les disciplines. L'objet commun que constitue le modèle et les données qu'il produit permettent de faire en sorte que le processus de modélisation ne soit pas qu'une expérience de pensée. Cet objet matérialisé, parce qu'il peut être exploré, guide l'expérience collective et constitue ainsi une interface commune, support au dialogue entre des chercheurs venant de différentes disciplines, en laissant l'exploration guider ce dialogue.

C'est en cela que la démarche mise en place autour de la construction et de l'évaluation peut être considérée comme facilitant la « mise en situation d'étonnement » (BANOS 2005, p. 241). L'exploration des hypothèses thématiques, par le modèle, et du modèle, par ses sorties, stimulent ainsi le cheminement abductif qui permet de dépasser les *a priori* et implicites disciplinaires et d'aboutir à la réalisation d'un modèle utile à tous ses concepteurs.

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons proposé et illustré une approche engagée de modélisation de dynamiques spatiales sur le temps long. Cette approche s'appuie sur un contexte interdisciplinaire et plaide pour la co-construction de modèles de simulation à base d'agents par le recours à des méthodes qui en facilitent la démarche. L'approche d'ensemble proposée a été mise en œuvre sur le cas d'étude de la modélisation des transformations du système de peuplement du Nord-Ouest européen entre 800 et 1100, à l'aide d'un groupe composé de modélisateurs et d'experts thématiciens (archéologues, historiens et géographes). Cette modélisation a débouché sur la conception et l'implémentation d'un modèle de simulation à base d'agents, SIMFEODAL, qui s'inscrit dans un paradigme descriptif, exploratoire et à visée heuristique. Afin d'évaluer ce modèle par le biais des données spatio-temporelles massives qu'il génère, nous avons conçu une méthode d'évaluation fondée sur l'analyse graphique d'indicateurs de sortie de simulation : l'évaluation visuelle. Pour faciliter l'emploi de cette méthode d'évaluation, nous avons conçu et développé un outil interactif dédié à l'exploration des sorties du modèle SIMFEODAL, la plateforme SIMEDB. Cet outil permet à chacun des membres du projet, thématicien comme modélisateur, de mener ses propres explorations des dynamiques simulées par le modèle et ainsi de gagner en compréhension de son comportement, favorisant l'itération entre les hypothèses thématiques et leurs résultats simulés.

Le dernier chapitre a permis d'effectuer un retour réflexif, méthodologique et conceptuel sur le travail mené dans cette expérience de modélisation interdisciplinaire. Dans cette conclusion, nous reviendrons tout d'abord plus généralement sur la progression globale de cette thèse et sur ce qui lui donne sa cohérence. Nous présenterons ensuite les nombreuses perspectives qui ont émergé de ce travail, chacune d'entre elles étant liées aux différentes disciplines et sous-disciplines mobilisées.

Synthèse du travail

Dans le chapitre 1, nous décrivons le contexte, personnel et collectif, de mise en œuvre de ce travail. Cela permet d'en établir le positionnement à l'interface entre la géographie, la géomatique, les sciences historiques, les sciences de la complexité et l'informatique. À partir de ce positionnement hybride, nous sommes en mesure de spécifier

l'objet de la thèse et de justifier le cas d'étude choisi. C'est depuis les spécificités de ce cas d'étude que sont proposées les approches principales défendues dans cette thèse. Celles-ci reposent, d'une part, sur la co-construction d'un modèle via le paradigme de la simulation à base d'agents et, d'autre part, sur le recours à la comparaison et à l'exploration visuelle de données spatio-temporelles. Ces deux approches méthodologiques sont proposées car elles permettent d'établir des interfaces entre les disciplines, et visent à faciliter la réalisation collective d'un processus de modélisation des transformations dans les systèmes de peuplements sur le temps long.

L'approche proposée est mise en œuvre dans le chapitre 2. Dans ce chapitre, nous présentons plus avant le cas d'étude, fondé sur la modélisation des dynamiques de polarisation, de hiérarchisation et de fixation de l'habitat rural entre 800 et 1200 dans la région Touraine. Nous décrivons ensuite le modèle de simulation à base d'agents que nous avons construit, SIMFEODAL, en suivant le formalisme ODD (GRIMM, BERGER et al. 2010). Ce modèle à visée exploratoire suit l'approche KIDS de EDMONDS et MOSS (2005). Il se classe ainsi dans la catégorie des modèles descriptifs, avec de nombreux types d'agents (foyers paysans, seigneurs, églises paroissiales, pôles d'attraction, etc.) dont les interactions multiscalaires font émerger les dynamiques étudiées. Le modèle SIMFEODAL constitue dès lors un support de discussion et d'analyse pour notre groupe de travail, contribuant ainsi au rôle heuristique de cette démarche collective et interdisciplinaire.

Le chapitre 3 présente une synthèse sur l'évaluation des modèles de simulations et propose, à partir de celle-ci, une méthode adaptée à l'évaluation collective et interdisciplinaire de modèles complexes. Cette méthode, l'*« évaluation visuelle »*, se situe dans le prolongement de la *face validation* et s'appuie sur la création d'*« indicateurs de sortie de simulation »* qui sont des représentations synthétiques numériques et graphiques des dynamiques générées par le modèle. Pour évaluer le modèle, on compare ces indicateurs à des « ordres de grandeur » et à des « formes stylisées », c'est-à-dire à des « indices empiriques », selon une grille d'évaluation fixée *a priori*. Par la réalisation de phases d'évaluation fréquentes et itératives, on procède au « paramétrage » du modèle, c'est-à-dire à son amélioration par l'intermédiaire de modifications des mécanismes et d'ajustement des paramètres. Nous défendons ainsi une approche exploratoire du modèle, guidée par de nombreux allers-retours entre sa construction et son évaluation. Nous illustrons enfin cette approche par une analyse rétrospective des différentes versions ponctuant l'évolution de SIMFEODAL.

Pour faciliter l'exercice d'évaluation visuelle, nous construisons un outil interactif dédié à l'exploration des données de sortie de SIMFEODAL, la plateforme SIMEDB, que nous présentons dans le chapitre 4. Cette plateforme résulte d'une succession de réponses aux contraintes génériques et spécifiques posées par la nature volumineuse et hétérogène des données permettant la génération des indicateurs de sortie. Après avoir retracé l'historique des solutions choisies pour faciliter l'évaluation de SIMFEODAL à chaque phase de sa construction, nous justifions le choix d'organisation des données qui en sont issues sous forme de bases de données relationnelle analytique. Une telle structuration est nécessaire à une capacité d'interrogation robuste, performante et évolutive de ces données. La plateforme SIMEDB est alors décrite en explicitant d'une part les

contraintes qu'elle doit permettre de surmonter, et d'autre part les solutions techniques mises en œuvre pour assurer une exploration interactive, intuitive et rapide des sorties de SIMFEODAL. Cette plateforme, développée pour un cas spécifique mais conçue dans un cadre générique, rend ainsi l'exploration de ces données spatio-temporelles massives accessible à chacun.

Dans le chapitre 5 nous présentons le calibrage du modèle SIMFEODAL ainsi que les indicateurs de sortie du modèle issu de ce calibrage, et ce, grâce à l'utilisation de la plateforme SIMEDB. Ces résultats sont analysés au regard de la grille d'évaluation fixée dans le chapitre 3. Une fois le modèle globalement calibré et satisfaisant du point de vue thématique, nous discutons de ce qui limite l'achèvement du calibrage, notamment du fait de l'incomplétude des sources empiriques disponibles et d'une compréhension insuffisante des effets des paramètres. Nous menons alors une analyse visuelle de la sensibilité du modèle qui contribue à son évaluation générale et permet d'identifier des points potentiels d'amélioration de SIMFEODAL. Le calibrage et l'analyse de sensibilité agissent ainsi comme des méthodes d'exploration du modèle, et permettent d'enrichir la compréhension des interactions entre ses différentes composantes.

Sous une forme « pré-conclusive » et en réponse au chapitre 1, le chapitre 6 est l'occasion d'effectuer un retour réflexif sur les spécificités du travail mené au cours de cette thèse. En premier lieu, nous revenons sur les spécificités méthodologiques et techniques qu'imposent l'analyse de données de simulation. En marquant la différence de ces dernières vis-à-vis de données plus classiques manipulées en sciences humaines et sociales, nous justifions et encourageons le recours à la visualisation pour explorer ces « données intermédiaires » et favoriser, en cela, une posture abductive. En second lieu, nous réalisons un retour d'expérience critique sur la posture de co-construction interdisciplinaire suivie lors de la construction et l'évaluation du modèle. En analysant *a posteriori* cette expérience collective, les implications de chacun et la trajectoire de SIMFEODAL au fil du temps, nous étayons l'importance d'une implication de chaque participant à chaque étape de la modélisation, comme cela a effectivement été le cas dans la construction et l'évaluation collective de ce modèle co-construit en interdisciplinarité.

Perspectives

Ce manuscrit clôt un retour sur une expérience de plus de six années de travail, mais ouvre aussi la voie à de très nombreuses perspectives d'approfondissements et de prolongations. La multiplicité des perspectives émergeant de ce travail relève selon nous de deux facteurs combinés. D'une part, cela est dû à la diversité des types de propositions qui sont faites au cours de cette thèse : élaboration d'une approche conceptuelle de co-construction de modèle à base d'agents, réalisation du modèle SIMFEODAL, proposition méthodologique d'évaluation visuelle, etc. D'autre part, le positionnement de la thèse à l'interface de plusieurs disciplines et la mobilisation de plusieurs approches parmi ces dernières renforce l'aspect foisonnant des perspectives.

Poursuivre la modélisation de SimFeodal. Dans le chapitre 5, nous avons identifié certaines limites à la poursuite du calibrage de SIMFEODAL, et donc à son amélioration. L'analyse de sensibilité menée ensuite a néanmoins ouvert de nouvelles pers-

pectives d'amélioration, en mettant notamment en évidence le rôle inattendu joué par certains paramètres. Il serait fructueux, par la suite, de concentrer le travail sur ces paramètres, en particulier en poursuivant le calibrage du modèle à partir des paramètres ayant une influence nette sur un indicateur et peu d'effets secondaires sur les autres (section 5.2.3.3).

En nous fondant sur les récentes avancées en simulation informatique distribuée, on pourrait chercher à prolonger l'exploration de SIMFEODAL. Pour cela, il est possible de faire appel soit à différentes méthodes d'optimisation en identifiant des « fonctions objectifs », soit à des méthodes d'exploration automatique du paysage des sorties du modèle. Parmi celles-ci, il serait intéressant de tester l'influence réelle de la situation initiale de SIMFEODAL, qui est générée aléatoirement suivant les valeurs de paramètres *d'input*. C'est un travail qui a été fait sur des modèles KISS (RAIMBAULT et al. 2019) et qui nous semble intéressant à mettre en œuvre en vue, par exemple, de tester l'hypothèse d'isotropie qui est au cœur de la conception de SIMFEODAL. En testant différentes situations initiales de manière plus systématique, on pourrait alors chercher à tester l'effet de configurations initiales plus variées, par exemple dans le cas de la modélisation des dynamiques spatiales que l'on analyserait sur d'autres régions d'étude.

Toujours dans le domaine de la simulation, sur le plan théorique, SIMFEODAL gagnerait sans doute à être « modularisé ». Cela pourrait se faire en transformant le modèle pour le doter d'une structure plus générique, sur laquelle on pourrait dès lors connecter (ou non) différents « modules » correspondant aux spécificités du modèle. En s'engageant dans cette dynamique de multi-modélisation (COTTINEAU et al. 2019), il serait par exemple possible de tester des situations avec ou sans églises paroissiales, en ajoutant d'autres types d'attracteurs dotés de mécanismes propres, en modifiant les mesures de satisfaction, etc. La nature très paramétrique de SIMFEODAL permet déjà d'effectuer certains de ces tests, mais des changements plus importants des mécanismes risqueraient de rompre la rétro-compatibilité du modèle. Avec un modèle modulaire, toutes les variantes qui ont été testées puis abandonnées au cours de la construction et du paramétrage du modèle pourraient véritablement être confrontées *ceteris paribus*.

Cette réalisation théorique et technique permettrait par ailleurs de faciliter la conduite de nouveaux cas d'études thématiques et empiriques. Ainsi, du point de vue de la modélisation en archéologie et en histoire, on gagnerait nécessairement en connaissances sur les processus spatiaux modélisés en menant une « validation croisée » thématique du modèle, comme proposé dans le chapitre précédent (section 6.1.3, p. 338). Il s'agirait ainsi de tester la généricité du modèle en l'adaptant à d'autres cas d'études, par exemple à d'autres régions, où l'on retrouve les mêmes dynamiques spatiales que celles observées en Touraine. À l'inverse, tester le modèle sur des régions où les facteurs semblent comparables mais où les structures spatiales résultantes sont très différentes – c'est pas exemple le cas du Quercy où il n'y a eu qu'une faible polarisation de l'habitat – permettrait aussi de progresser dans la compréhension de la conjonction de facteurs nécessaires et suffisants pour qu'apparaissent la polarisation, la hiérarchisation et la fixation du peuplement. Avec la possibilité méthodologique d'activer et de désactiver les « modules » de SIMFEODAL, il serait enfin possible de systématiser la simulation de ces cas d'études spécifiques, et ainsi d'être en mesure de généraliser plus fortement nos

hypothèses thématiques.

Dans l'ensemble, toutes ces pistes héritées de la modélisation en sciences sociales et en sciences de la complexité permettraient, pour la géographie, d'éclairer les conditions d'émergence des phénomènes de polarisation et de hiérarchisation, constatés dans une grande diversité de systèmes géographiques, tant en termes d'époques que d'espaces. En développant et en élargissant l'analyse de ce cas d'étude, on contribuerait ainsi à discuter les différentes théories qui proposent d'expliquer l'organisation spatiale des systèmes sociaux (auto-organisation (PUMAIN, SANDERS et SAINT-JULIEN 1989), attachement préférentiel (ALBERT et BARABÁSI 2002), théorie évolutive des villes (PUMAIN 1997), etc.).

Développement et mise à l'épreuve de l'évaluation visuelle. Dans le chapitre 3, nous avons proposé une méthode d'évaluation des modèles basée sur l'analyse visuelle d'indicateurs de sortie de simulation nombreux et variés. Dans le cas de SIMFEODAL, l'usage de cette méthode a été utile et fructueux. Toutefois, il nous semble que l'on pourrait aller plus loin dans son usage.

Une première piste, largement inspirée par la géomatique et l'analyse spatiale, serait de chercher à mieux rendre compte, visuellement, des configurations spatiales produites par le modèle. Dans le chapitre 6 (section 6.1.1, p. 329), nous présentions ainsi les difficultés de l'exécution de « résumés statistiques » (sur la dimension réplicative notamment) des données géographiques issues d'un espace théorique et principalement aléatoire. Pour améliorer la qualité et la vitesse de l'évaluation des sorties d'une version du modèle, nous sommes convaincus que l'utilisation de plus nombreux indicateurs issus de l'analyse spatiale et des géostatistique serait plus efficace que la démultiplication des représentations spatiales provenant de chaque simulation. À l'aide d'indicateurs de dispersion, de méthodes de classification spatiale de l'espace, ou encore de résumés de lissages cartographiques, on serait ainsi en mesure de « dé-spatialiser » des indicateurs relatifs à l'espace, et dès lors de les agréger à travers différentes temporalités, réplications ou expériences, pour en comparer par exemple l'évolution moyenne au cours du temps simulé.

Une autre limite, spécifique à la réalisation technique de la plateforme d'exploration des données SIMEDB, est la difficulté croissante d'interrogation rapide des données à mesure que celles-ci augmentent. Comme l'après-propos du chapitre 4 l'indique, nous n'avons finalement pas été en mesure de stocker et interroger les données individuelles des foyers paysans lors des dernières phases d'exploration du modèle. Avec la production de 20 millions de lignes de données pour chaque expérience, sur une quinzaine d'expériences, on atteignait alors les limites techniques de l'environnement utilisé, limites difficilement dépassables sans changer d'infrastructure informatique matérielle. En reprenant la typologie du chapitre 6 (tableau 6.1, p. 329), on approchait ainsi assez largement d'une volumétrie de big data et d'exigences de calcul intensif. Le champ scientifique de l'informatique graphique nous semble proposer deux approches opposées pour résoudre ce problème d'interrogation rapide de jeux de données toujours plus massifs, sans faire pour autant appel à des méthodes d'optimisation plus coûteuses matériellement (AMIRPOUR AMRAII 2018). Il s'agit, pour l'interrogation des données, d'avoir recours soit à l'approximation, soit à des requêtes incrémentales (*ibid.*, p. 28–

33).

L'approximation consiste à effectuer une requête rapide, quitte à ne renvoyer qu'une approximation heuristique du résultat. Cette possibilité dépend avant tout du système de gestion de base de données (SGBD) qui organise les données. Ce dernier doit être capable de produire une approximation aussi exacte que possible pour retourner son résultat au regard du temps maximal qu'on lui donne. C'est un enjeu majeur de la recherche en bases de données pour traiter des corpus de plus en plus importants de manière interactive. Selon les mots de FEKETE (2013, p. 7) : « Providing the mechanisms for exploration in databases and analysis systems will benefit to all the situations when users are willing to trade accuracy for time, an important issue since time is becoming one of our most important resources ». De nouvelles solutions logicielles permettant de telles requêtes sont régulièrement proposées ([orr_entropydb_2019](#)), mais la relative jeunesse de ce champ le rend encore instable. Pour exemple, la solution BlinkDB (AGARWAL et al. 2013) présentée dans le chapitre 4 a depuis été abandonnée, notamment au profit de EntropyDB.

La faculté de mener des requêtes incrémentales s'inscrit dans la recherche en informatique, autour de l'idée de « *progressive visual analytics* » (STOLPER, PERER et GOTZ 2014), de « *progressive analytics* » (FEKETE et PRIMET 2016), ou encore de « *progressive data science* » (TURKAY et al. 2018). Plutôt que de demander à une base de données de renvoyer une unique approximation d'un résultat, il s'agit de récupérer régulièrement des résultats de plus en plus précis, correspondant à des approximations successives de plus en plus fines. Contrairement aux méthodes d'approximation, ces approches « progressives » ont l'avantage d'être déterministes (la dernière approximation correspond en fait au résultat « objectif » de la requête) et donc de permettre des comparaisons très rapides entre résultats de simulation, tout en permettant de renvoyer des résultats précis au prix d'une attente un peu plus élevée. La principale difficulté d'intégration de telles méthodes à une plateforme existante telle que SIMEDB est qu'il faut changer non seulement le SGBD, mais aussi le mode de requête afin que l'affichage des indicateurs de sortie soit actualisé régulièrement pour prendre en compte les nouvelles approximations. Cette piste demande donc d'importants développements informatiques, mais nous semble extrêmement stimulante comme possibilité d'interrogation de données très massives.

Une autre piste d'amélioration de la plateforme, liée cette fois à l'analyse de données exploratoires, porte sur la collecte de retours utilisateurs automatisés en vue de fouille automatisée de données. Cette idée est présente dans notre travail depuis le début de la thèse, mais n'a pu être menée à bien par faute de temps. L'enjeu est de récupérer les « *notations* » des indicateurs de chaque simulation (décris dans la section 4.4.2.3, p. 261) et d'utiliser ces données comme une source d'analyse. Par exemple, avec des analyses factorielles portant sur les indicateurs de sortie, les expériences qu'ils décrivent et les notes données par chacun des participants, il devrait être possible d'identifier de manière quantitative les expériences les plus satisfaisantes, mais aussi les indicateurs qui sont les moins utiles, ou encore d'identifier des expériences qui auraient été peu évaluées visuellement mais au profil proche d'expériences notées positivement.

De telles approches de « fouille de données » (*data mining*), voire d'apprentissage auto-

matique, constituerait en outre un premier pas vers une évaluation de la plateforme SIMEDB et des choix effectués dans le cadre de sa conception, ce qui constitue une perspective importante de ce travail. L'évaluation des méthodes visuelles est en effet au cœur de nombreuses pratiques de la communauté d'informatique graphique et nous semble indispensable pour juger de la validité de l'approche mise en œuvre dans ce travail de thèse. Dans le cas de SIMEDB, une telle analyse est difficile car les utilisateurs de la plateforme sont captifs, dans le sens où il n'ont pas d'alternative pour évaluer les sorties de SIMFEODAL. SIMEDB ne s'adresse pas non plus à un grand public, et le recrutement de « testeurs » externes, pour mesurer l'effectivité de notre plateforme à réaliser les tâches d'évaluation du modèle, serait aussi vain. L'évaluation de notre proposition de méthode d'évaluation visuelle est donc un chantier de recherche important, sans doute difficilement réalisable en tant que tel. Pour aller dans ce sens, cependant, l'application de méthodes d'évaluation visuelle à d'autres modèles serait sans doute un premier pas non négligeable et qui pourrait de plus être mené dans un délai raisonnable, par exemple dans le cadre de projets de modélisation interdisciplinaire déjà en cours.

Généraliser l'approche de co-construction. Ces réflexions conclusives sur l'évaluation de la méthode d'évaluation visuelle proposée dans ce travail nous semblent centrales. On pourrait même les généraliser à l'ensemble des propositions de cette thèse : la réalisation d'évaluations – qu'elles portent sur un modèle, sur une approche de co-construction, sur une démarche d'évaluation visuelle ou encore sur un outil interactif d'exploration – permet systématiquement de gagner en connaissance sur ce qui est évalué, et ainsi de l'améliorer. Cette thèse, comme indiqué dans l'Introduction générale, constitue avant tout une proposition méthodologique. À ce titre, la meilleure évaluation globale consiste en la reproduction des approches qui y sont promues sur des cas d'études variés. Cela est d'autant plus vrai concernant l'évaluation de l'approche de co-construction interdisciplinaire de modèle. En co-construisant de nouveaux modèles, potentiellement avec d'autres disciplines des sciences humaines et sociales, cette approche horizontale fondée sur l'accompagnement à la modélisation ne peut qu'être étayée et éprouvée. De la même manière que la formalisation de démarche de modélisation d'accompagnement, ComMod (COMMOD 2005) résulte avant tout d'une somme d'expériences partagées et synthétisées par un collectif pluriel de chercheurs impliqués en recherche-action, il nous semble que la multiplication des expériences de co-construction interdisciplinaire de modèles en sciences humaines et sociales serait le moyen privilégié d'étoffer ou de réviser les propositions de ce travail.



Les paramètres de SimFeodal.

A.1 Niveau de précision des *inputs*

Nom	Variétés	Nombre par défaut en début de simulation	Objectifs à atteindre en fin de simulation ¹²
Foyers Paysans	Nombre	4 000*	4 000*
	Part de foyers paysans non mobiles (serfs, esclaves)	20 %*	20 %*
	Part de foyers paysans dispersés	95 % environ*	20 %*
Agrégats de population	Village	20*	200*
	Agglomération	4 ¹³⁺	16 ¹⁴⁺
Seigneurs	Grands Seigneurs	2 [†]	2 [†]
	Petits Seigneurs	18*	200*
Zones de prélèvement	Loyers	18*	Objectif non fixé <i>a priori</i>
	Droits de haute justice	0 [†]	Objectif non fixé <i>a priori</i>
	Droits de basse et moyenne justice	0 [†]	Objectif non fixé <i>a priori</i>
	Droits banaux	0 [†]	Objectif non fixé <i>a priori</i>
Attracteurs (effectifs ou potentiels)	Églises paroissiales	50 [†]	200 [†]
	Églises sans statut paroissial	150 [†]	100 [†]
	Châteaux	0 [†]	50 ¹⁵⁺

Tableau 3. Nombre d'agents présents dans l'espace modélisé (* : estimation jugée plausible; + : nombre fondé sur les données de la Touraine).

Tableau extrait de CURA, TANNIER et al. (2017, p. 317).

A.2 Définition et valeur des paramètres.

Inputs (configuration socio-spatiale initiale)

Description	Intitulé	Valeur par défaut
Espace du modèle		
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	80
Foyers paysans		
Nombre de foyers paysans dans la région modélisée	init_nb_total_fp	4000
Agrégats de foyers paysans		
Nombre de petites villes (agglomérations secondaires antiques)	init_nb_agglos	8
Nombre de foyers paysans contenus dans chaque petite ville	init_nb_fp_agglo	30
Nombre de villages	init_nb_villages	20
Nombre de foyers paysans contenus dans chaque village	init_nb_fp_village	10
Seigneurs (note : aucun château et seigneur châtelain)		
Nombre de grands seigneurs	init_nb_gs	2
Puissance relative des grands seigneurs. (La somme des puissances est égale à 1)	puissance_grand_seigneur1 puissance_grand_seigneur2	0.5 0.5
Nombre de petits seigneurs	init_nb_ps	18
Eglises		
Nombre total d'églises	init_nb_eglises	150
Nombre d'églises paroissiales	init_nb_eglises_paroissiales	50

Paramètres de contexte

Description	Intitulé	Valeur par défaut
Foyers paysans		
Taux de croissance du nombre de foyers paysans à chaque pas de simulation	croissance_demo	0.1422 (14,22 %)
Part des foyers paysans disparaissant et apparaissant à chaque pas de simulation	taux_renouvellement_fp	0.05 (5%)
Probabilité qu'un foyer paysan soit mobile uniquement localement	proba_fp_dépendant	0.2
Intensité du besoin de protection militaire	besoin_protection_fp	0 entre 800 et 940 0.2 en 960 0.4 en 980 0.6 en 1000 0.8 en 1020 1 à partir de 1040
Agrégats de foyers paysans		
Puissance des communautés villageoises	puissance_communauté	0.2 jusqu'en 1040 0.3 en 1060 et 1080 0.4 en 1100, 1120 et 1140 0.5 en 1160, 1180 et 1200
Probabilité pour qu'une communauté villageoise soit institutionnalisée au sein d'un agrégat à chaque pas de simulation.	proba_institution_communauté	0.2

Seigneurs		
Nombre total de seigneurs (petits et grands) à atteindre en fin de simulation.	objectif_nombre_seigneurs	200
Probabilité pour un grand seigneur d'acquérir des droits de haute justice à chaque pas de simulation.	proba_gain_haute_justice_gs	Avant 900 : 0 Entre 900 et 980 : 0.2 A partir de 1000 : 1
Probabilité, pour un petit seigneur, de créer une zone de prélèvement de droits de haute justice autour de tous ses châteaux existants et à venir, lors de la création d'un nouveau château.	proba_gain_haute_justice_chate au_ps	Avant 1000 : 0 A partir de 1000 : 0.2
Date à partir de laquelle les seigneurs peuvent céder des droits à d'autres seigneurs en échange de leur fidélité	debut_cession_droits_seigneurs	880
Date à laquelle les seigneurs (petits et grands) peuvent donner leur(s) château(x) en garder à d'autres seigneurs en échange de leur fidélité	debut_garde_chateaux_seigneurs	960
Châteaux		
Date à partir de laquelle des châteaux peuvent être construits par les seigneurs	debut_construction_chateaux	940
Période au cours de laquelle les châteaux peuvent devenir des gros châteaux	periode_promotion_chateaux	de 940 à 1040 inclus

Paramètres de mécanisme

Description	Intitulé	Valeur par défaut
Foyers paysans		
Distance entre un foyer paysan et l'église paroissiale la plus proche au-delà de laquelle le foyer paysan n'est plus totalement satisfait	dist_min_eglice	Avant 960 : 5 km De 960 à 1060 : 3 km Après 1060 : 1,5 km
Distance entre un foyer paysan et l'église paroissiale la plus proche à partir de laquelle le foyer paysan est totalement insatisfait	dist_max_eglice	Avant 960 : 25 km De 960 à 1060 : 10 km Après 1060 : 5 km
Distance entre un foyer paysan et le château le plus proche au-delà de laquelle le foyer paysan n'est plus totalement satisfait	dist_min_chateau	1,5 km
Distance entre un foyer paysan et le château le plus proche à partir de laquelle le foyer paysan est totalement insatisfait	dist_max_chateau	5 km
Rayon de distance dans lequel un foyer paysan effectue une migration locale	rayon_migration_locale_fp	2500 m.
Propension à entreprendre une migration lointaine	prop_migration_lointaine_fp	0.2
Agégats de foyers paysans		
Nombre minimum de foyers paysans nécessaires pour constituer un agrégat	nb_min_fp_agregat	5
Distance maximale entre les foyers paysans et les attracteurs les plus proches pour qu'ils soient considérés comme faisant partie d'un même agrégat	distance_detection_agregat	100 m.
Seigneurs		
Probabilité qu'un des petits seigneurs crée un château à chaque pas de simulation.	proba_construction_chateau_ps	0.5
Probabilité, pour un petit seigneur lorsqu'il apparaît	proba_collecte_foncier_ps	0.1 (10%)

dans la simulation, de prélever des droits fonciers (via la création d'une zone de prélèvement)		
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	0.15 (15%)
Rayon minimum et maximum des zones de prélèvement créées par les petits seigneurs, hors châteaux	rayon_min_zp_ps rayon_max_zp_ps	1000 m. 5000 m.
Proportion minimale et maximale de foyers paysans s'acquittant de droits dans chaque zone de prélèvement d'un petit seigneur (droits fonciers et autres droits, hors châteaux).	min_taux_prelevement_zp_ps max_taux_prelevement_zp_ps	0.05 (5%) 0.25 (25%)
Proportion de foyers paysans s'acquittant de droits dans chaque zone de prélèvement relevant d'un château (droits fonciers, droits de haute justice et autres droits)	taux_prelevement_zp_chateau	1 (100%)
A chaque pas de simulation, probabilité pour un petit seigneur de céder une partie de ses droits sur chacune de ses zones de prélèvement (droits fonciers et autres droits, hors châteaux), indépendamment les unes des autres.	proba_cession_droits_zp	0.33 (33%)
Rayon maximum du voisinage dans lequel un petit seigneur peut céder localement des droits à d'autres seigneurs ou bien créer un château	rayon_voisinage_ps	5000 m.
Lors de la cession de droits par un petit seigneur sur une de ses zones de prélèvement hors château, probabilité pour que le seigneur récipiendaire du don soit localisé à moins de 'rayon_voisinage_ps' du seigneur donneur. Sinon, le récipiendaire est localisé à plus de 'rayon_voisinage_ps'.	proba_cession_locale	0.8 (80 %)
A chaque pas de temps et pour chaque château possédé par un seigneur, probabilité de le donner en garde à un petit seigneur qui n'est pas déjà châtelain	proba_don_chateau	0.5
Châteaux		
Rayon minimum et maximum des zones de prélèvement associées à un château lors de sa création. Toutes les zones de prélèvement d'un château (trois au maximum) ont le même rayon	rayon_min_zp_chateau rayon_max_zp_chateau	2000 m. 15000 m.
Distance minimale entre un château nouvellement créé et les châteaux existants	dist_min_entre_chateaux	3000 m.
Probabilité qu'un château créé le soit dans un agrégat	proba_chateau_agregat	0.5 (50%)
Probabilité qu'un château situé dans ou à proximité d'un pôle comportant au moins un attracteur en plus du château devienne un gros château	proba_promotion_chateau_pole	0.8
églises paroissiales		
Pondération (en nombre de foyers paysans) de la probabilité qu'une nouvelle église paroissiale soit créée au sein d'un agrégat	ponderation_creation_paroisse_agregat	2000
Nombre minimum de foyers paysans insatisfaits requis pour la création d'une nouvelle église paroissiale en-dehors d'un agrégat	seuil_nb_paroissiens_insatisfaits	20
Pôles d'attraction		
Attractivité d'un petit château	attractivite_petit_chateau	0.15

Attractivité d'un gros château	attractivite_gros_chateau	0.25
Attractivité d'une église paroissiale	attractivite_1_eglide	0.15
Attractivité de deux églises paroissiales	attractivite_2_eglide	0.25
Attractivité de trois églises paroissiales	attractivite_3_eglide	0.50
Attractivité de quatre églises paroissiales et plus	attractivite_4_eglide	0.60
Attractivité d'une communauté villageoise	attractivite_communauta	0.15

Paramètres techniques

Description	Intitulé	Valeur par défaut
Foyers paysans		
Montant maximal des redevances acquittées par un foyer paysan au-delà duquel celui-ci est poussé à se déplacer. (La valeur de ce paramètre est propre à chaque région modélisée)	coef_redevance	15
Valeur minimale de satisfaction protection quand la distance du foyer paysan au château le plus proche dépasse <i>dist_max_chateau</i>	min_s_distance_chateau	0.01
Aggrégats de foyers paysans		
Largeur de la zone tampon créée autour de l'enveloppe de chaque agrégat	distance_fusion_agregat	100 m.
Seigneurs		
Droits de haute justice : montant des redevances perçues par le seigneur détenteur de la zone de prélèvement pour chaque foyer paysan assujetti	droits_haute_justice_zp	2
Droits de haute justice : montant des redevances perçues, pour chaque foyer paysan assujetti, par le seigneur ayant cédé ses droits sur la zone de prélèvement à un autre seigneur	droits_haute_justice_zp_cession	2.5
Prélèvement de droits fonciers : montant des redevances perçues par le seigneur détenteur de la zone de prélèvement pour chaque foyer paysan assujetti	droits_fonciers_zp	1
Prélèvement de droits fonciers : montant des redevances perçues, pour chaque foyer paysan assujetti, par le seigneur ayant cédé ses droits sur la zone de prélèvement à un autre seigneur	droits_fonciers_zp_cession	1.25
Autres droits : montant des redevances perçues par le seigneur détenteur de la zone de prélèvement pour chaque foyer paysan assujetti	autres_droits_zp	0.25
Autres droits : montant des redevances perçues, pour chaque foyer paysan assujetti, par le seigneur ayant cédé ses droits sur la zone de prélèvement à un autre seigneur	autres_droits_zp_cession	0.35
Nombre de tirages successifs de la probabilité qu'un grand seigneur crée un château.	nb_tirages_chateaux_gs	3
Nombre de tirages successifs de la probabilité qu'un des petits seigneurs crée un château.	nb_tirages_chateaux_ps	1

A.3 Valeurs de paramètres employées dans l'analyse de sensibilité.

INPUTS (12)			
Description	Intitulé	Valeur par défaut	Valeurs testées dans l'analyse de sensibilité
Espace du modèle			
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	80	[50,75,100,125,150]
Foyers paysans			
Nombre de foyers paysans dans la région modélisée	init_nb_total_fp	50000	[10000,25000,50000,75000,10000]
Agrégats de foyers paysans			
Nombre de petites villes (agglomérations secondaires antiques)	init_nb_agglos	8	[2,5,8,10,15]
Nombre de foyers paysans contenus dans chaque petite ville	init_nb_fp_agglo	30	[10,20,30,40,50]
Nombre de villages	init_nb_villages	20	[5,10,20,30,50]
Nombre de foyers paysans contenus dans chaque village	init_nb_fp_village	10	[5,10,15,20,25]
Seigneurs (note : aucun château et seigneur châtelain)			
Nombre de grands seigneurs	init_nb_gs	2	Non testé
Puissance relative des grands seigneurs. (La somme des puissances est égale à 1)	puissance_grand_seigneur1 puissance_grand_seigneur2	0.5 0.5	[0.1,0.2,0.3,0.4,0.5] (puissance_grand_seigneur1)
Nombre de petits seigneurs	init_nb_ps	18	[5,10,15,20,25]
Églises			
Nombre total d'églises	init_nb_eglises	150	[50,100,150,200,250]
Nombre d'églises paroissiales	init_nb_eglises_paroissiales	50	[10, 30, 50, 70, 90]

Paramètres de contexte (13)			
Description	Intitulé	Valeur par défaut	Valeurs testées dans l'analyse de sensibilité
Foyers paysans			
Taux de croissance du nombre de foyers paysans à chaque pas de simulation	croissance_demo	0.1422 (14,22%)	avec variation pop_init (pour 40k final constant): 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 : 13500 croissance_demo : 0.0372 & init_nb_total_fp : 20000 croissance_demo : 0.0153 & init_nb_total_fp : 30000
Part des foyers paysans disparaissant et apparaissant à chaque pas de simulation	taux_renouvellement_fp	0.05 (5%)	[0, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1]
Probabilité qu'un foyer paysan soit mobile uniquement localement	proba_fp_dependant	0.2	[0, 0.1, 0.2, 0.35, 0.5]
Intensité du besoin de protection militaire	besoin_protection_fp	0 entre 800 et 940 0.2 en 960 0.4 en 980 0.6 en 1000 0.8 en 1020 1 à partir de 1040	0 tout au long 1 tout au long 1 dès 1000 0.5 avant 1000, 1 après Graduel défaut

Agrégats de foyers paysans			
Puissance des communautés villageoises	puissance_communauté	0.2 jusqu'en 1040 0.3 en 1060 et 1080 0.4 en 1100, 1120 et 1140 0.5 en 1160, 1180 et 1200	0 tout au long 0.5 tout au long 0.5 dès 1040 0.5 avant 1040, 1 après Graduel défaut
Probabilité pour qu'une communauté villageoise soit institutionnalisée au sein d'un agrégat à chaque pas de simulation.	proba_institution_communauté	0.2	[0, 0.1, 0.2, 0.35, 0.5]
Seigneurs			
Nombre total de seigneurs (petits et grands) à atteindre en fin de simulation.	objectif_nombre_seigneurs	200	[100, 150, 200, 250, 300]
Probabilité pour un grand seigneur d'acquérir des droits de haute justice à chaque pas de simulation.	proba_gain_haute_justice_gs	Avant 900 : 0 Entre 900 et 980 : 0.2 A partir de 1000 : 1	0 tout au long 1 tout au long Graduel défaut 0 + 0.1/an à partir de 900 Avant 1000:0 puis 0.5
Probabilité, pour un petit seigneur, de créer une zone de prélèvement de droits de haute justice autour de tous ses châteaux existants et à venir, lors de la création d'un nouveau château.	proba_gain_haute_justice_chateau_ps	Avant 1000: 0 A partir de 1000 : 0.2	0 tout au long 0.2 tout au long 0.0 avant 1000, 0.5 après 0.5 tout au long Graduel défaut
Date à partir de laquelle les seigneurs peuvent céder des droits à d'autres seigneurs en échange de leur fidélité	debut_cession_droits_seigneurs	880	[820, 860, 880, 920, 1000]
Date à laquelle les seigneurs (petits et grands) peuvent donner leur(s) château(x) en garder à d'autres seigneurs en échange de leur fidélité	debut_garde_chateau_seigneurs	960	[940, 1000, 1060, 1120, 1200]
Châteaux			
Date à partir de laquelle des châteaux peuvent être construits par les seigneurs	debut_construction_chateaux	940	[820, 880, 940, 1000, 1060]
Période au cours de laquelle les châteaux peuvent devenir des gros châteaux	periode_promotion_chateaux	de 940 à 1040 inclus	940-1040 940-1200 1100-1200 1000-1100 940-1000

Paramètres de mécanisme (33)			
Description	Intitulé	Valeur par défaut	Valeurs testées dans l'analyse de sensibilité
Foyers paysans			
Distance entre un foyer paysan et l'église paroissiale la plus proche au-delà de laquelle le foyer paysan n'est plus totalement satisfait	dist_min_eglise	Avant 960 : 5 km De 960 à 1060 : 3 km Après 1060 : 1,5 km	[800::5000, 960::3000, 1060::1500] & [800::25000, 960::10000, 1060::5000] [800::5000] & [800::25000] [800::1500, 960::1000, 1060::500] & [800::5000, 960::3000, 1060::1500] [800::25000, 960::10000, 1060::5000] & [800::50000, 960::25000, 1060::10000] [800::1500] & [800::5000]
Distance entre un foyer paysan et l'église paroissiale la plus proche à partir de laquelle le foyer paysan est totalement insatisfait	dist_max_eglise	Avant 960 : 25 km De 960 à 1060 : 10 km Après 1060 : 5 km	[800::5000, 960::3000, 1060::1500] [800::25000, 960::10000, 1060::5000] & [800::50000, 960::25000, 1060::10000] [800::1500] & [800::5000]
Distance entre un foyer paysan et le château le plus proche au-delà de laquelle le foyer paysan n'est plus totalement satisfait	dist_min_chateau	1,5 km	[1500, 5000] [500, 4000] [5000, 8500] [1500, 3000] [3000, 5000]
Distance entre un foyer paysan et le château le plus proche à partir de laquelle le foyer paysan est totalement insatisfait	dist_max_chateau	5 km	
Rayon de distance dans lequel un foyer paysan effectue une migration locale	rayon_migration_locale_fp	[800::2500]	[800::1000] [800::2500, 1000::5000] [800::2500] [800::5000, 1000::10000] [800::1000, 1000::2500]
Propension à entreprendre une migration lointaine	prop_migration_lointaine_fp	0.2	[0.0, 0.1, 0.2, 0.35, 0.5]
Agrégats de foyers paysans			
Nombre minimum de foyers paysans nécessaires pour constituer un agrégat	nb_min_fp_agregat	5	[3, 5, 7, 10, 15]
Distance maximale entre les foyers paysans et les attracteurs les plus proches pour qu'ils soient considérés comme faisant partie d'un même agrégat	distance_detection_agregat	100m.	[50, 100, 150, 200, 300]
Seigneurs			
Probabilité qu'un des petits seigneurs crée un château à chaque pas de simulation.	proba_construction_chateau_ps	0.5	[0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0]
Probabilité, pour un petit seigneur lorsqu'il apparaît dans la simulation, de prélever des droits fonciers (via la création d'une zone de prélèvement)	proba_collecter_foncier_ps	0.1 (10%)	[0.0, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5]
Probabilité, pour un petit seigneur, de créer une nouvelle zone de prélèvement d'autres droits dans	proba_creation_zp_autres_droits_ps	0.15 (15%)	[0.0, 0.05, 0.15, 0.25, 0.35]

son voisinage à chaque pas de simulation			
Rayon minimum et maximum des zones de prélèvement créées par les petits seigneurs, hors châteaux	rayon_min_zp_ps rayon_max_zp_ps	1000 m. 5000 m.	[1000, 5000] [500, 4500] [5000, 9000] [1000, 3000] [3000, 5000]
Proportion minimale et maximale de foyers paysans s'acquittant de droits dans chaque zone de prélèvement d'un petit seigneur (droits fonciers et autres droits, hors châteaux).	min_taux_prelevement_zp_ps max_taux_prelevement_zp_ps	0.05 (5%) 0.25 (25%)	[0.05, 0.25] [0.0, 0.2] [0.25, 0.5] [0.05, 0.15] [0.15, 0.25]
Proportion de foyers paysans s'acquittant de droits dans chaque zone de prélèvement relevant d'un château (droits fonciers, droits de haute justice et autres droits)	taux_prelevement_zp_chateau	1 (100%)	[0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1]
A chaque pas de simulation, probabilité pour un petit seigneur de céder une partie de ses droits sur chacune de ses zones de prélèvement (droits fonciers et autres droits, hors châteaux), indépendamment les unes des autres.	proba_cession_droits_zp	0.33 (33%)	[0.0, 0.15, 0.33, 0.5, 0.75]
Rayon maximum du voisinage dans lequel un petit seigneur peut céder localement des droits à d'autres seigneurs ou bien créer un château	rayon_voisinage_ps	5000 m.	[1000, 2500, 5000, 7500, 10000]
Lors de la cession de droits par un petit seigneur sur une de ses zones de prélèvement hors château, probabilité pour que le seigneur récipiendaire du don soit localisé à moins de 'rayon_voisinage_ps' du seigneur donneur. Sinon, le récipiendaire est localisé à plus de 'rayon_voisinage_ps'.	proba_cession_locale	0.8 (80 %)	[0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0]
A chaque pas de temps et pour chaque château possédé par un seigneur, probabilité de le donner en garde à un petit seigneur qui n'est pas déjà châtelain	proba_don_chateau	0.5	[0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0]
Châteaux			

Rayon minimum et maximum des zones de prélèvement associées à un château lors de sa création. Toutes les zones de prélèvement d'un château (trois au maximum) ont le même rayon	rayon_min_zp_chateau rayon_max_zp_chateau	2000 m. 15000 m.	[2000, 15000] [500, 10000] [5000, 20000] [2000, 5000] [5000, 15000]
Distance minimale entre un château nouvellement créé et les châteaux existants	dist_min_entre_chateaux	3000 m.	[0, 1500, 3000, 5000, 7500]
Probabilité qu'un château créé le soit dans un agrégat	proba_chateau_agregat	0.5 (50%)	[0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0]
Probabilité qu'un château situé dans ou à proximité d'un pôle comportant au moins un attracteur en plus du château devienne un gros château	proba_promotion_chateau_pole	0.8	[0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0]
Églises paroissiales			
Pondération (en nombre de foyers paysans) de la probabilité qu'une nouvelle église paroissiale soit créée au sein d'un agrégat	ponderation_creation_paroisse_agregat	2000	[500, 1000, 2000, 3000, 5000]
Nombre minimum de foyers paysans insatisfaits requis pour la création d'une nouvelle église paroissiale en-dehors d'un agrégat	—	20	[5, 10, 20, 30, 50]

Pôles d'attraction		
Attractivité d'un petit château	attractivite_petit_chateau	0.15
Attractivité d'un gros château	attractivite_gros_chateau	0.25
Attractivité d'une église paroissiale	attractivite_1_eglide	0.15
Attractivité de deux églises paroissiales	attractivite_2_eglide	0.25
Attractivité de trois églises paroissiales	attractivite_3_eglide	0.50
Attractivité de quatre églises paroissiales et plus	attractivite_4_eglide	0.60
Attractivité d'une communauté villageoise	attractivite_communauté	0.15

"base" :
 attractivite_petit_chateau : 0.15
 attractivite_gros_chateau : 0.25
 attractivite_1_eglide : 0.15
 attractivite_2_eglide : 0.25
 attractivite_3_eglide : 0.5
 attractivite_4_eglide : 0.6
 attractivite_communauté : 0.15

"renforce_chateaux" :
 attractivite_petit_chateau : 0.25
 attractivite_gros_chateau : 0.5
 attractivite_1_eglide : 0.05
 attractivite_2_eglide : 0.1
 attractivite_3_eglide : 0.25
 attractivite_4_eglide : 0.35
 attractivite_communauté : 0.15

"renforce_eglises" :
 attractivite_petit_chateau : 0.05
 attractivite_gros_chateau : 0.15
 attractivite_1_eglide : 0.2
 attractivite_2_eglide : 0.4
 attractivite_3_eglide : 0.6
 attractivite_4_eglide : 0.7
 attractivite_communauté : 0.15

"renforce_communauté" :
 attractivite_petit_chateau : 0.1
 attractivite_gros_chateau : 0.2
 attractivite_1_eglide : 0.1
 attractivite_2_eglide : 0.2
 attractivite_3_eglide : 0.35
 attractivite_4_eglide : 0.5
 attractivite_communauté : 0.3

"renforce_hierarchie" :
 attractivite_petit_chateau : 0.1
 attractivite_gros_chateau : 0.3
 attractivite_1_eglide : 0.05
 attractivite_2_eglide : 0.15
 attractivite_3_eglide : 0.35
 attractivite_4_eglide : 0.6
 attractivite_communauté : 0.1



Un exemple de rapport automatique des sorties de SimFeodal.

N.B. Le rapport automatique d'analyse des sorties de cette annexe correspond à la version 2.3 de SIMFEODAL, en dépit de son titre (Base 5.1) qui suit une ancienne numérotation des versions du modèle.

Analyse des sorties du modèle de la transition 8

Robin Cura

25 février 2016

Configuration : Base pour la partie 5.1 (200 réplications)

Objectifs quantitatifs à atteindre en fin de simulation (ordres de grandeur)

% latex table generated in R 3.2.3 by xtable 1.8-2 package % Tue Mar 22 16:03:57 2016

Indice	Objectif	Moyenne	Médiane	Q1	Q3	StDev	Min	Max
Nombre d'agrégats	200.00	145.30	145.00	137.00	152.00	404.02	118.00	177.00
Nombre de châteaux	50.00	69.78	69.00	60.00	80.00	11.54	37.00	121.00
Nombre de gros châteaux	10.00	9.60	10.00	8.00	11.00	0.95	1.00	18.00
Nombre d'églises paroissiales	300.00	167.90	167.50	162.00	173.00	2.66	142.00	191.00
Distance moyenne entre églises	3000.00	2944.00	2862.00	2643.00	3141.00	8.37	2267.00	4467.00
Proportion de FP isolés	0.20	0.49	0.49	0.47	0.50	14.39	0.44	0.54
Augmentation de la charge fiscale (ratio)	3.00	5.15	5.11	4.47	5.76	0.02	3.10	8.26

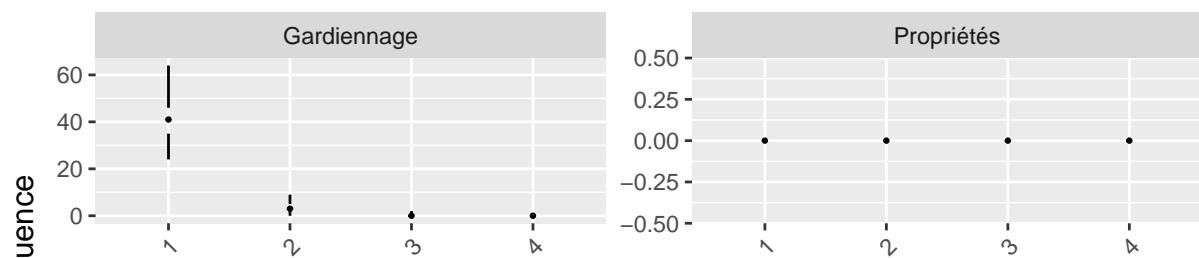
Indicateurs observés

Seigneurs et châteaux

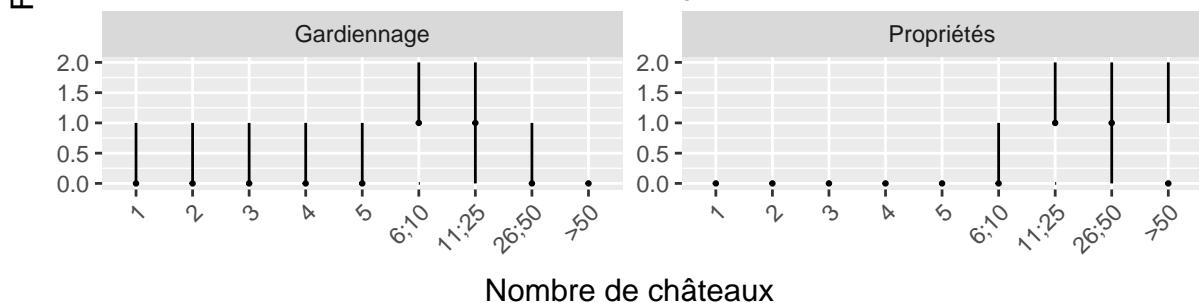
Nombre de seigneurs châtelains en fonction du nombre de château possédés/gardés

Distribution des possessions et gardiennages de châteaux

Chatelains



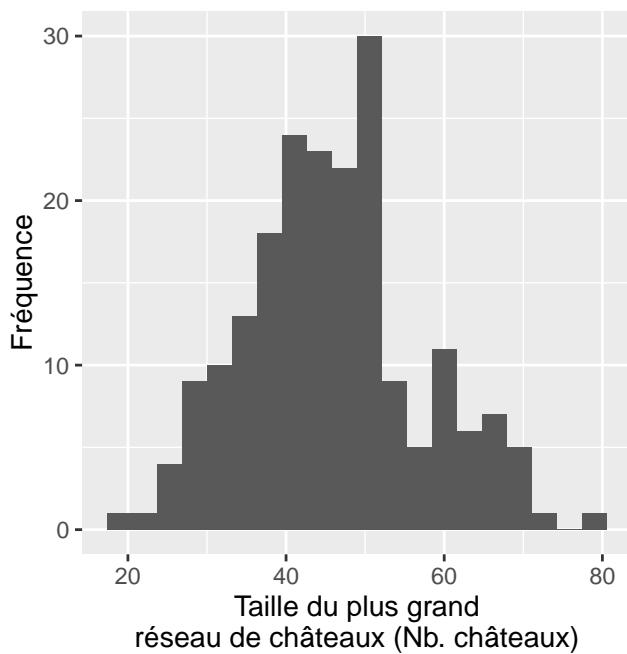
Grands Seigneurs



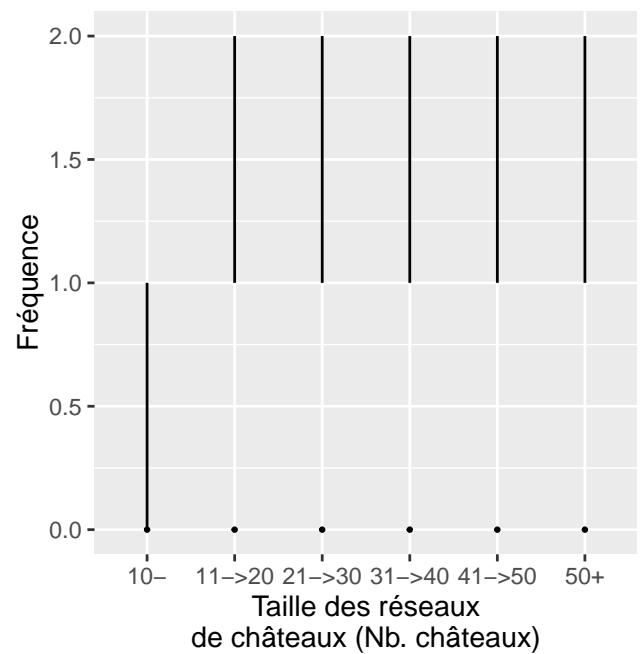
Nombre de châteaux

Nn réseau de châteaux est défini comme l'ensemble des châteaux possédés par un seigneur donné

Distribution des réseaux de châteaux maximums

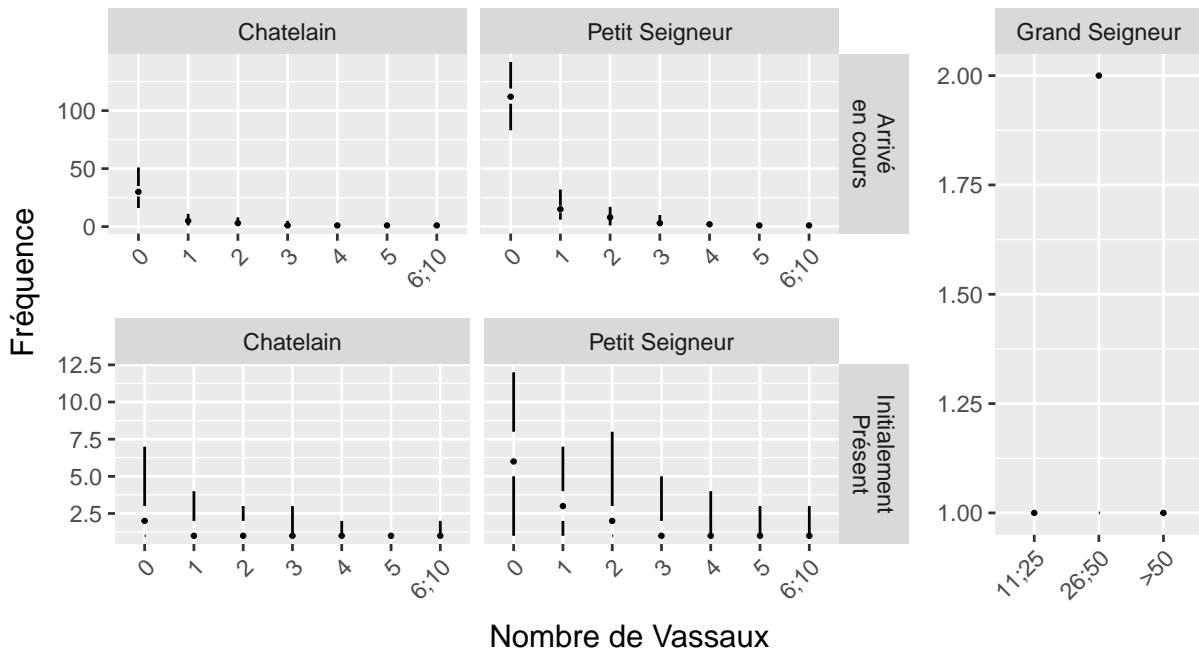


Distribution des réseaux de châteaux



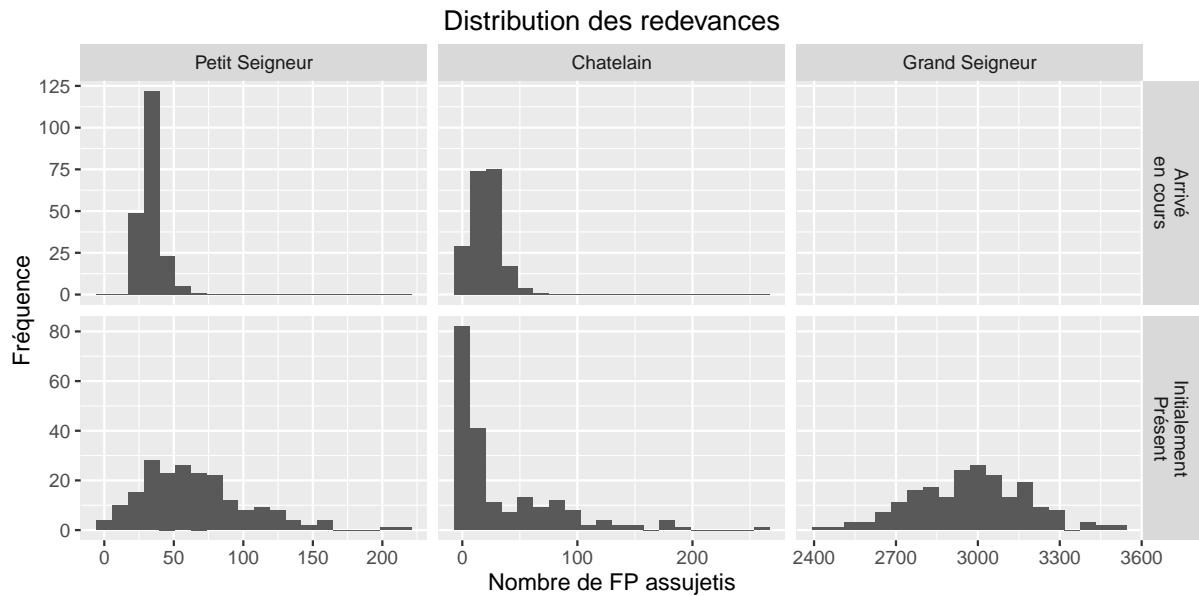
Seigneurs et Vassaux

Distribution du nombre de vassaux selon les types de seigneurs



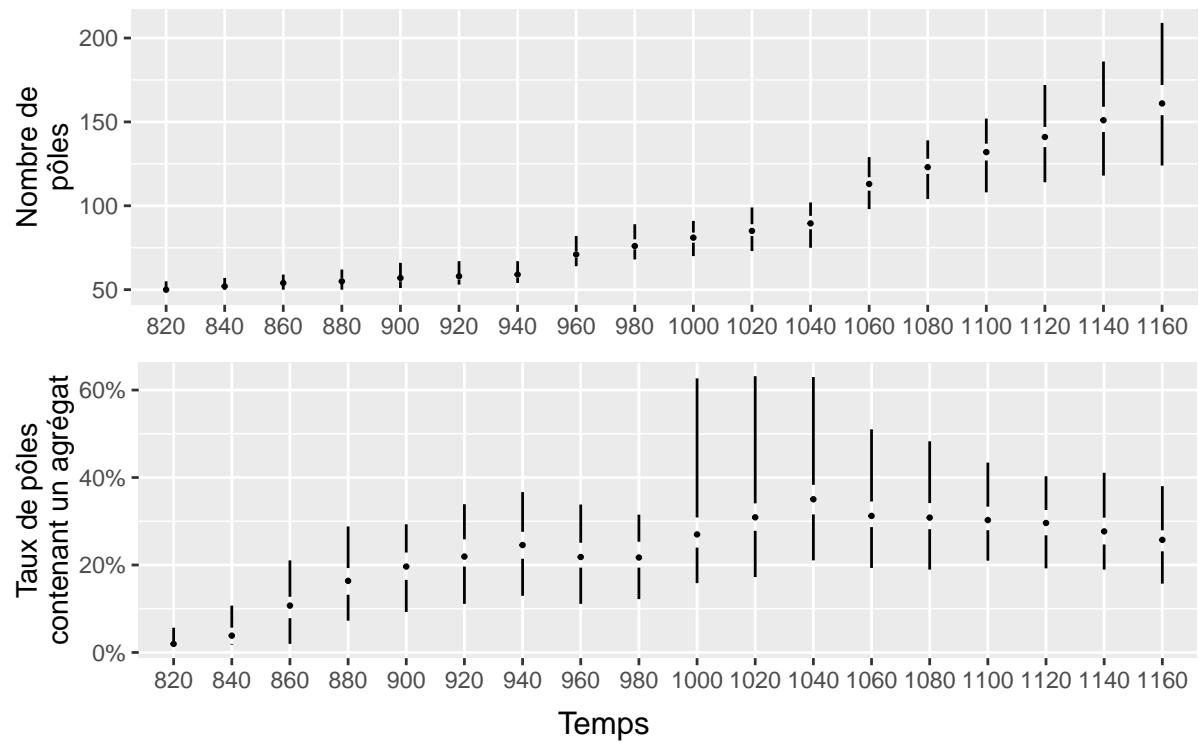
Seigneurs et Redevances

En fin de simulation : pour les 18 petits seigneurs présents dès 800 versus les autres petits seigneurs : montant des redevances perçues.

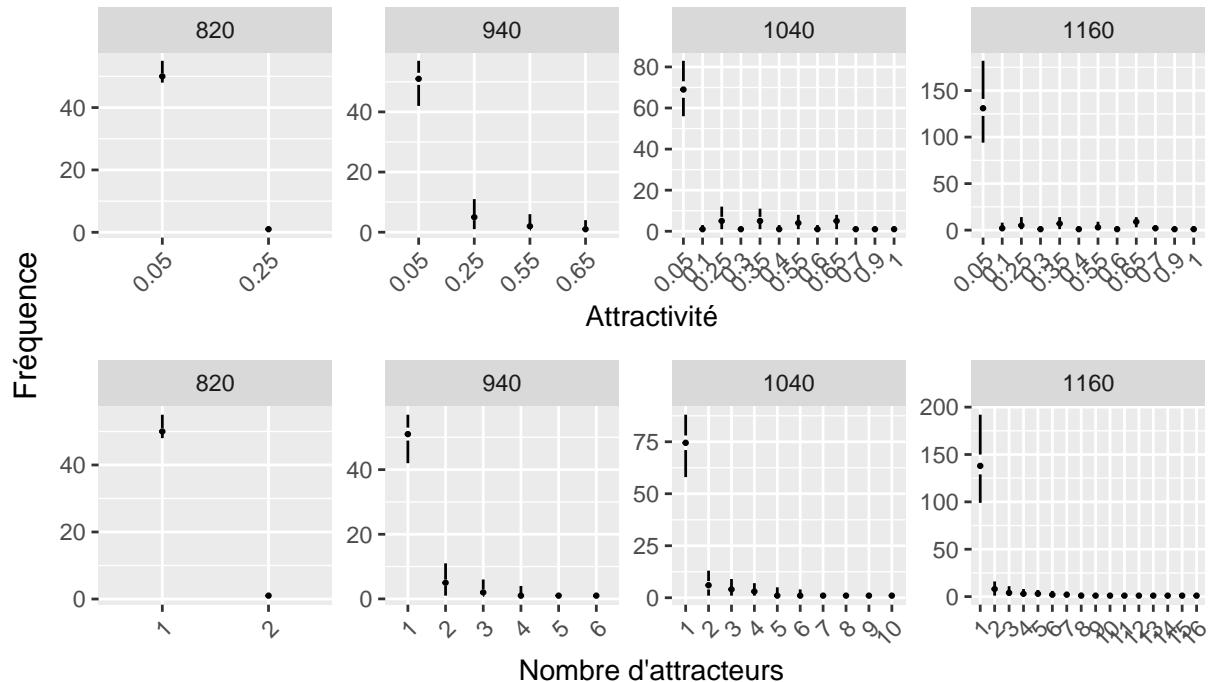


Attractivité des Pôles

```
## Warning: Removed 155 rows containing non-finite values (stat_fivenumber).
```



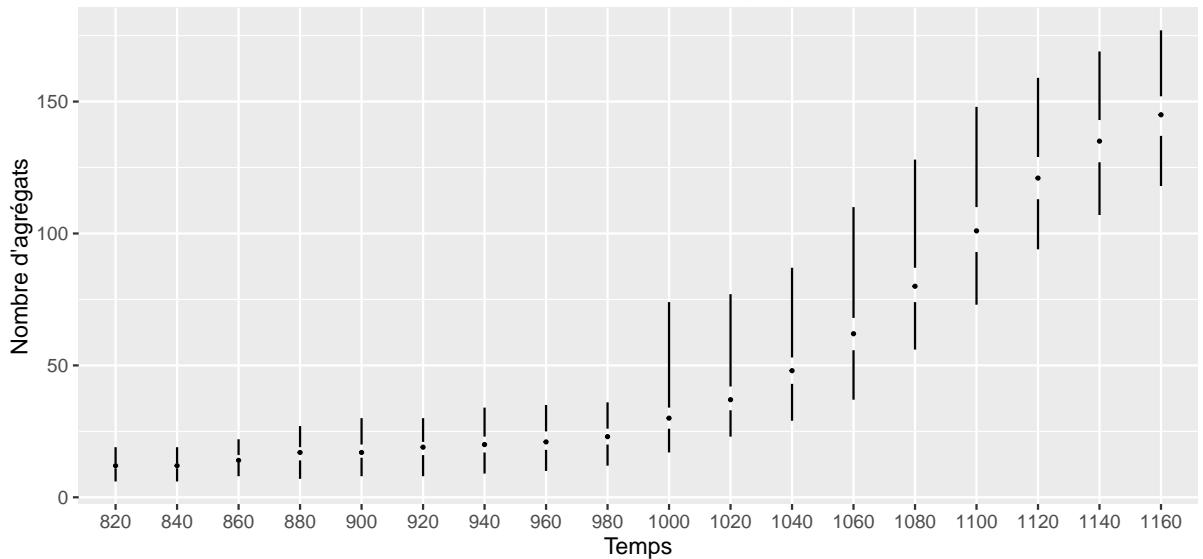
Évolution de la composition des pôles



Agrégats

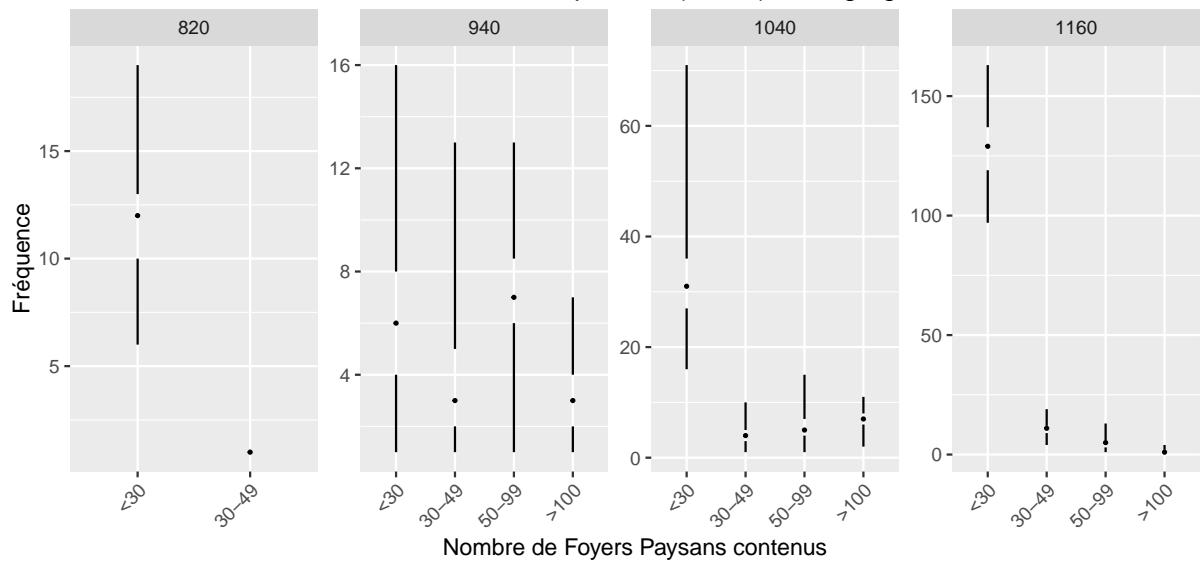
- Nombre

Évolution du nombre d'agrégats



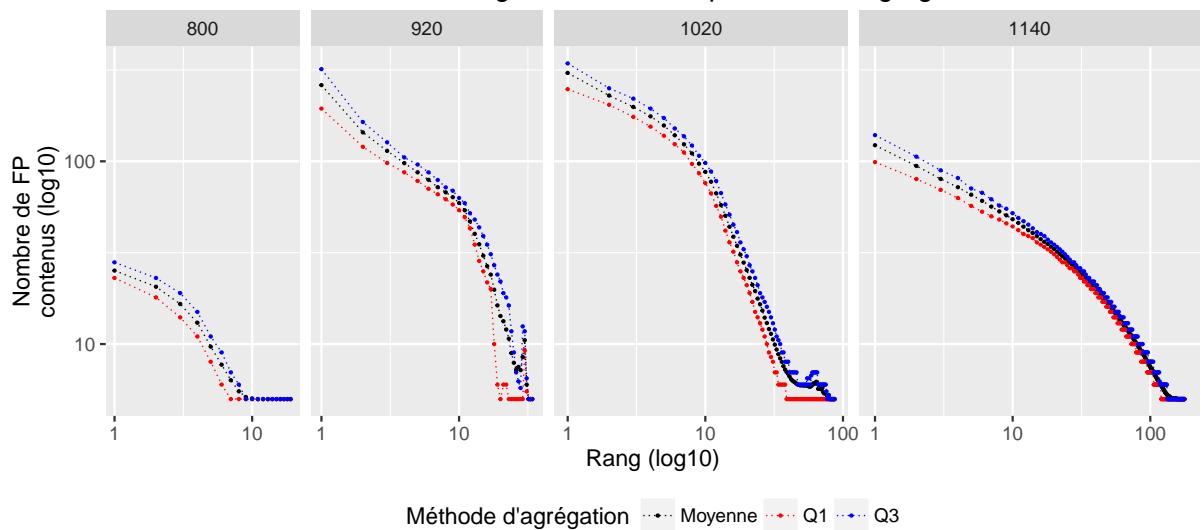
- Composition

Évolution de la composition (en FP) des agrégats

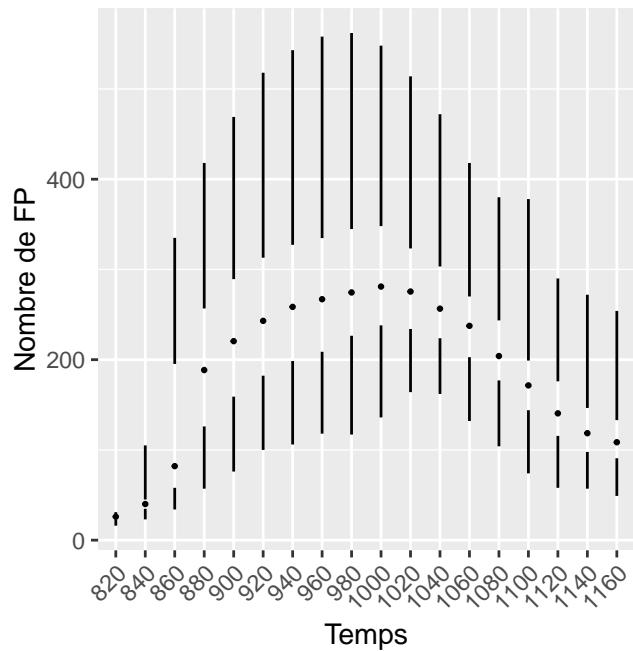


- Rang-taille

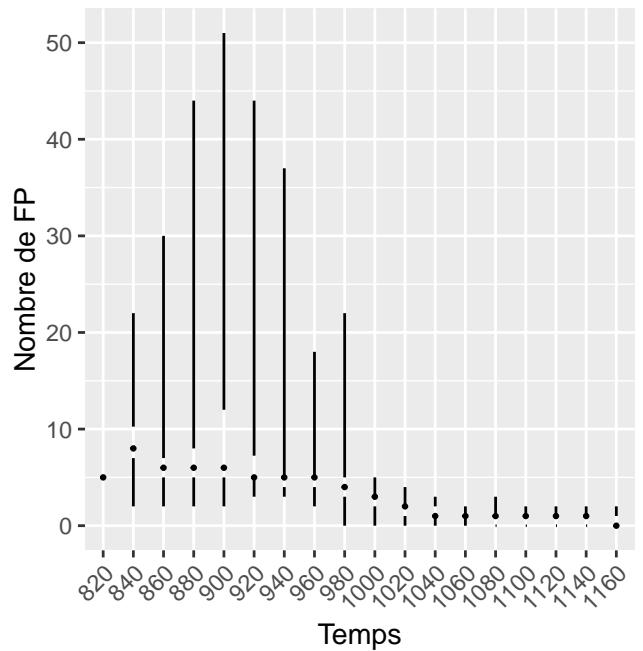
Évolution rang-taille de la composition des agrégats



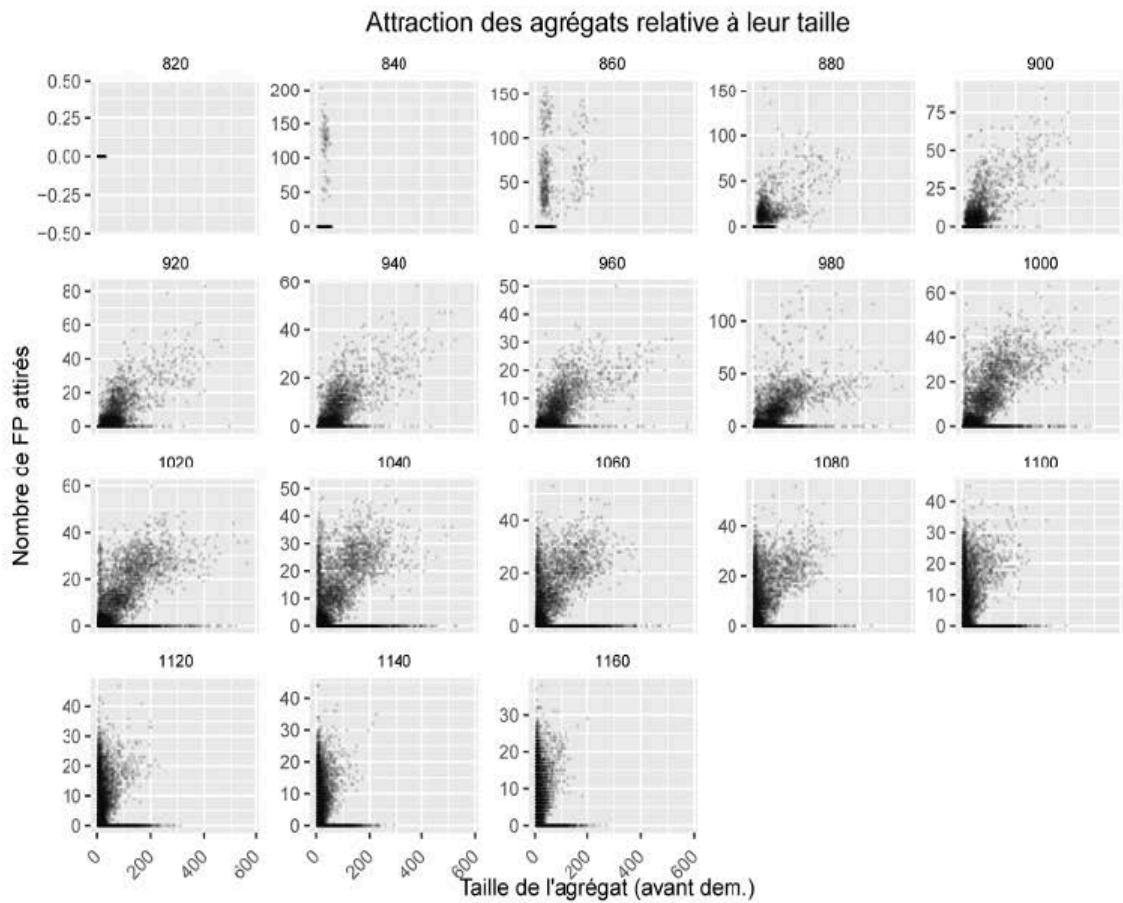
Évolution de l'agrégat
le plus peuplé



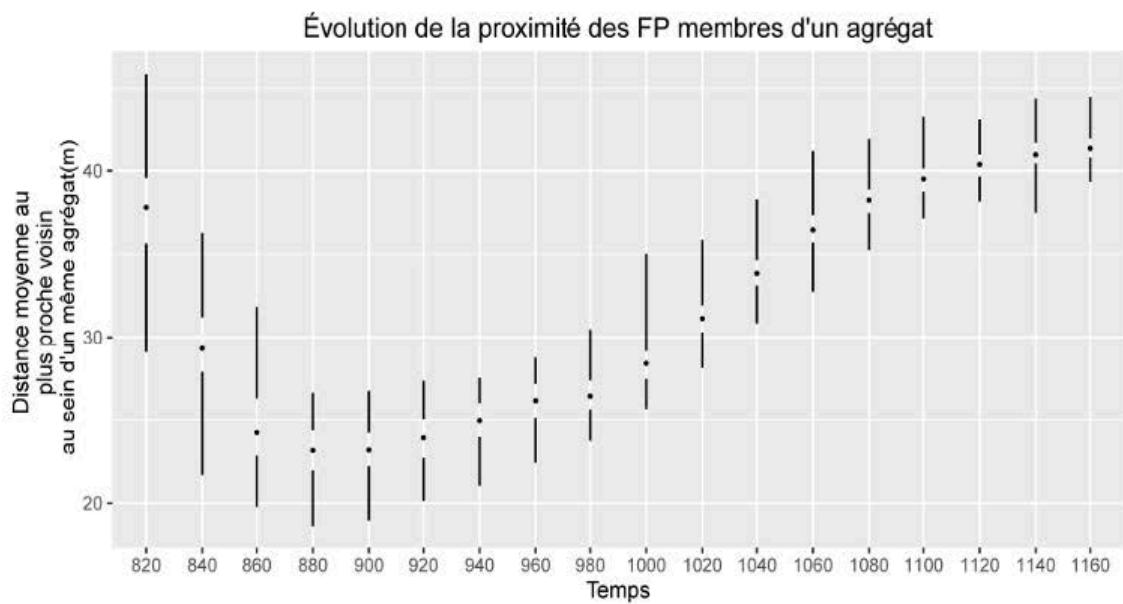
Évolution de l'agrégat
le moins peuplé



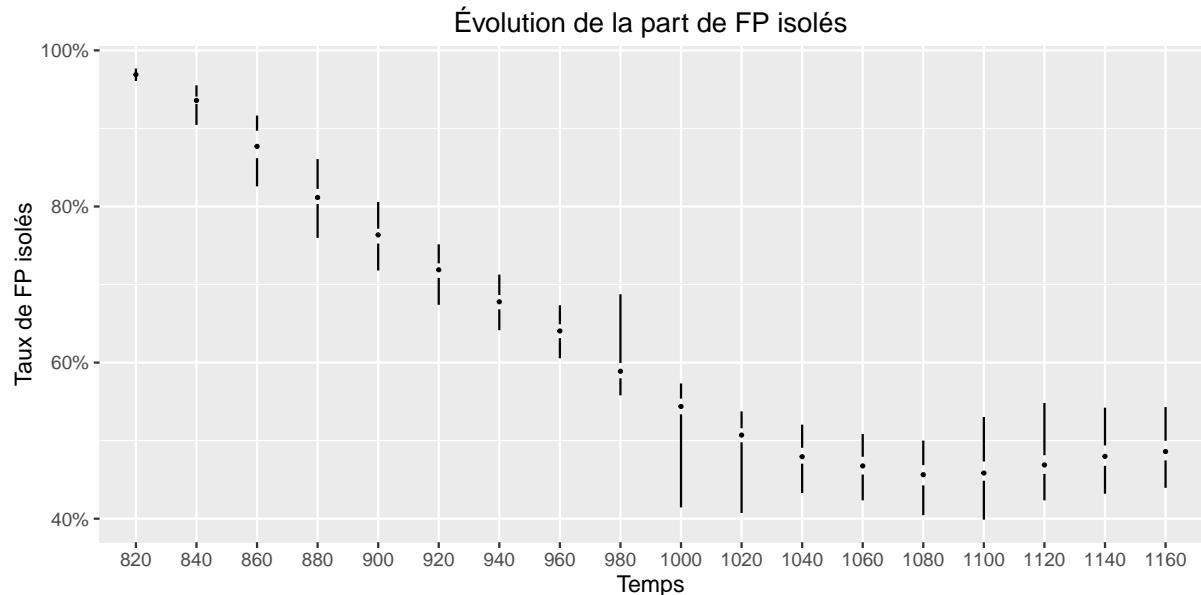
- Attraction / Attractivité



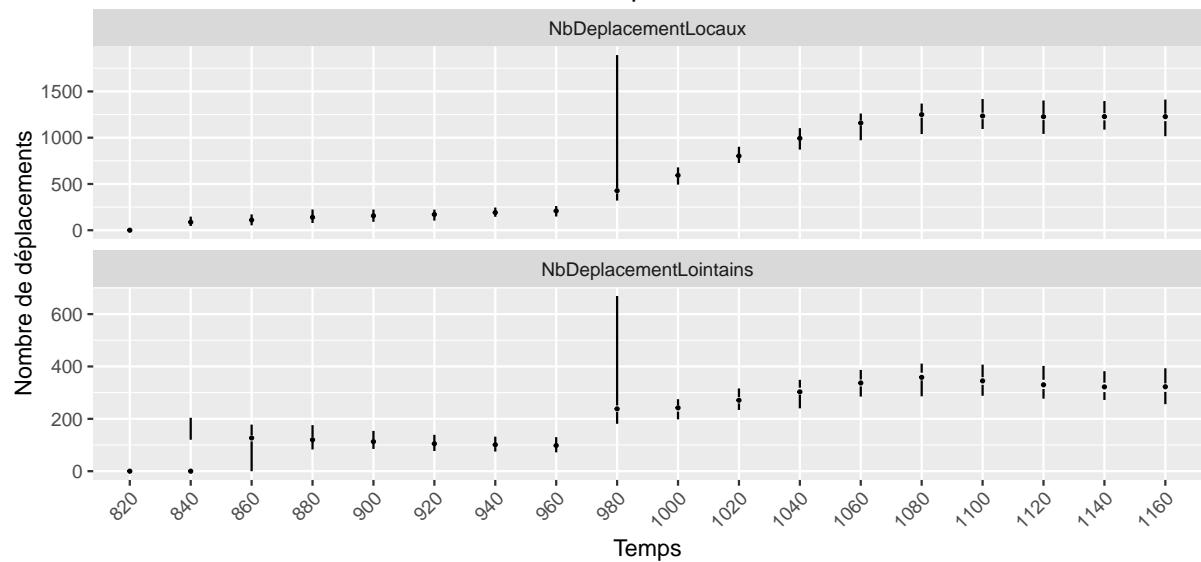
- Courbe pour toute la durée de simulation : au sein des agrégats, distance moyenne d'un foyer paysan à son plus proche voisin



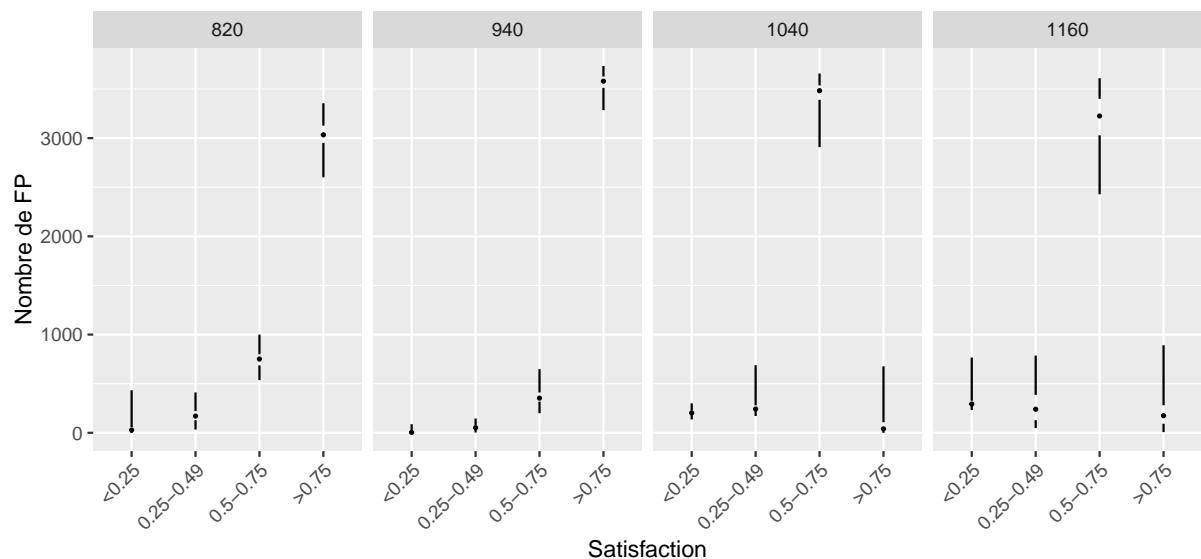
Foyers Paysans



Évolution des déplacements des FP



Évolution de la satisfaction des FP



Références

- ACADEMIE FRANÇAISE (2019). *Interface*. In : *Dictionnaire de l'Académie Française, 9ème Édition*. URL : <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9I1677>.
- 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. New York, NY, USA : ACM, p. 29-42. DOI : 10/bwrd. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2465351.2465355>.
- ALBERT, Réka et Albert-László BARABÁSI (2002). « Statistical Mechanics of Complex Networks ». In : *Reviews of Modern Physics* 74.1, p. 47-97. DOI : 10/cb5h4c. URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.74.47>.
- 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, Tim LAMMARSCH 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>.
- ARCHAEOMEDES (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>.
- AXTELL, Robert (2000). « Why Agents ?: On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences ». In :

-
- 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>.
- BANOS, Arnaud, Florent LE NÉCHET et al. (2017). « Simuler Des Transitions : Une Introduction Aux Modèles Spatio-Temporels ». In : SANDERS, Lena. *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 89-110. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10536>.
- BANOS, Arnaud et Lena SANDERS (2012). « Vers Une Cartographie Sémantique Des Modèles Urbains : Des Individus Aux Systèmes de Villes ». In : HÉGRON, Gérard. *Modélisation Urbaine : De La Représentation Au Projet*. Paris : Commissariat Général au Développement Durable, p. 52-64.
- (2013). « Modéliser et Simuler Les Systèmes Spatiaux En Géographie ». In : VARENNE, Franck et Marc SILBERSTEIN. *Modéliser & Simuler - Pratiques de La Modélisation et de La Simulation*. T. 2. Sciences & Philosophie. Éditions Matériologiques, p. 833-864.
- 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 : 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/frmd5t. URL : <https://www.nature.com/articles/nature05302>.
- (2015). « A Perspective on City Dashboards ». In : *Regional Studies, Regional Science* 2.1, p. 29-32. DOI : 10/gfw9mr. URL : <https://doi.org/10.1080/21681376.2014.987540>.

- BATTY, Michael et al. (1973). « Spatial System Design and Fast Calibration of Activity Interaction-Allocation Models ». In : *Regional Studies* 7.4, p. 351-366. DOI : 10 / fm65dh. URL : <https://rsa.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09595237300185381>.
- 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/c2g532. 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/bdzddp. 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 Multidimensional Model ». In : *Proceedings of the 8th ACM International Workshop on Data Warehousing and OLAP. DOLAP '05*. 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*. Lyon, INSA. URL : <http://www.theses.fr/2007ISAL0105>.
- BOISSAVIT-CAMUS, Brigitte et al. (2005). « Chrono-Chorématique Urbaine : Figurer l'espace-Temps Des Villes ». In : *Temps et Espaces de l'homme En Société : Analyse et Modèles Spatiaux En Archéologie. XXVèmes Rencontres Internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*. Sous la dir. de Jean-François BERGER et al. Antibes, France : APDCA, p. 67-81.
- 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 (2017). « Transition 9 : Vers Des Systèmes de Villes Intégrés (France, XVIIIe-XIXe Siècles) ». In : SANDERS, Lena. *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles. 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.
- (2000). « Des Modèles En Géographie ? Sens d'une Recherche ». In : *Bulletin de la Société de Géographie de Liège* 2, p. 21-30.
- 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/d9fmmk. URL : <https://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*, 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>.
- ÇÖLTEKIN, 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>.
- 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 (2005). « La modélisation comme outil d'accompagnement ». In : *Natures Sciences Sociétés* 13.2, p. 165-168. DOI : 10 / b3dc2p. URL : <https://www.nss-journal.org/articles/nss/abs/2005/02/nss5207/nss5207.html>.
- (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>.
- COTTINEAU, Clementine (2014). « L'évolution Des Villes Dans l'espace Post-Soviétique. Observation et Modélisations. » Thèse de Doctorat. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- COTTINEAU, Clémentine et al. (2019). « Chapter 4 : Incremental Territorial Modelling ». In : PUMAIN, Denise. *Geographical Modeling*. ISTE. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02314965>.
- COUPÉ, Christophe et al. (2017a). « 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>.
- (2017b). « Transition 2 : Modélisation de l'expansion Des Populations Bantu Dans Un Espace Déjà Habité Par Des Populations de Chasseurs-Collecteurs ». In : SANDERS, Lena. *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 143-172. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10566>.
- 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 ». URL : <https://github.com/RCura/CafeMethodo>.
 - (2017a). « Making Large Spatio-Temporal Data Analysis Easier. Illustrated Plea for Using (Geo)Visual Analytics. » 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, à paraître). « Visualisation de modèle ». In : PUMAIN, Denise. *La modélisation en géographie. Villes et territoires. Méthodologies de modélisation en sciences sociales*. Paris : ISTE.
- CURA, Robin, Mehdi BOUKHECHBA et al. (2014). « VisuAgent – Un Environnement d'exploration Visuelle de Données Spatio-Temporelles Issues de Simulation ». In : SAGEO 2014. Session Demo. Grenoble. URL : <http://rcura.github.io/VisuAgent/>.
- CURA, Robin, Clémentine COTTINEAU et al. (2017). « 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, 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, Cécile TANNIER et al. (2017). « 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.

-
- DERVILLE, Alain (1998). « La population du Nord au Moyen Age. I : avant 1384 ». In : *Revue du Nord* 80.326, p. 501-530. DOI : 10/ggf2j8. URL : https://www.persee.fr/doc/rnord_0035-2624_1998_num_80_326_2872.
- 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. DOI : 10/gfkd95. 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.
- (1999). « Jamais deux fois... Ou : de quelques précautions à prendre avec le temps ». In : *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims* 26.101, p. 5-23. DOI : 10/ggd36z. URL : https://www.persee.fr/doc/tigr_0048-7163_1999_num_26_101_1383.
- EDMONDS, Bruce, Laurence LESSARD-PHILLIPS et Ed FIELDHOUSE (2015). *A Complex Model of Voter Turnout*. Version 1.1. CoMSES Computational Model Library. URL : <https://www.comses.net/codebases/4368/releases/1.1.0/>.
- 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*. 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. (2017). « 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 ASSOCIATION. Eurographics Association, p. 87-108. URL : <https://hal.inria.fr/hal-00696814>.
- (2013). « Visual Analytics Infrastructures : From Data Management to Exploration ». In : *Computer* 46.7, p. 22-29. DOI : 10/ggf2j9.
- FEKETE, Jean-Daniel, Danyel FISHER 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>.
- FEKETE, Jean-Daniel et Romain PRIMET (2016). « Progressive Analytics : A Computation Paradigm for Exploratory Data Analysis ». In : arXiv : 1607.05162 [cs]. URL : <http://arxiv.org/abs/1607.05162>.
- 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*, p. 1-9.
- FIELDHOUSE, Ed, Laurence LESSARD-PHILLIPS et Bruce EDMONDS (2016). « Cascade or Echo Chamber ? A Complex Agent-Based Simulation of Voter Turnout ». In : *Party Politics* 22.2, p. 241-256. DOI : 10/f8dkph. URL : <https://doi.org/10.1177/1354068815605671>.
- 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. 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, 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 : *Journal 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.
- GRIMM, Volker, Uta BERGER 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>.
- 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 Steven F. RAILSBACK (2012). « Pattern-Oriented Modelling : A ‘Multi-Scope’ for Predictive Systems Ecology ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 367.1586, p. 298-310. DOI : 10.1098/rstb.2011.0180. URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2011.0180>.
- GRIMM, Volker, Eloy REVILLA et al. (2005). « Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based Complex Systems : Lessons from Ecology ». In : *science* 310.5750, p. 987-991. DOI : 10/fk5wc4.
- 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/drjwz2. 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*. 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/bm2pqn. 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*. URL : <https://CRAN.R-project.org/package=flexdashboard>.
- 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. 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>.
- JÉGOU, Laurent (2017). *Potentialités de l'analyse-réseau en histoire médiévale*. URL : <https://colemen.hypotheses.org/102>.
- 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://fkaplan.wordpress.com/2013/03/14/lancement-de-la-venice-time-machine/>.
- KEIM, Daniel, Gennady ANDRIENKO et al. (2008). « Visual Analytics : Definition, Process, and Challenges ». In : *Information Visualization*. Springer, p. 154-175.
- KEIM, Daniel, Jörn KOHLHAMMER et al. (2010). *Mastering the Information Age Solving Problems with Visual Analytics*. 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, 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>.
- KOHLER, Timothy A. et Stefani A. CRABTREE (2017). « Transition 3 : Village and Polity Formation in Pueblo Societies : How Population Growth Channels Social Processes in Neolithic Societies. The “Village” Model ». In : SANDERS, Lena. *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 173-192. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10569>.
- KRAVARI, Kalliopi et Nick BASSILIADES (2015). « A Survey of Agent Platforms ». In : *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 18.1, p. 11. DOI : 10/gfkmk7.

-
- LAFUERZA, Luis F. et al. (2016a). « Staged Models for Interdisciplinary Research ». In : *PLOS ONE* 11.6, e0157261. DOI : 10/gfw9pj. URL : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0157261>.
- (2016b). « Simplification and Analysis of a Model of Social Interaction in Voting ». In : *The European Physical Journal B* 89.7, p. 159. DOI : 10/gfw9pk. URL : <https://doi.org/10.1140/epjb/e2016-70062-2>.
- 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>.
- LAROUSSE (2019). *Interface*. In : *Dictionnaire de français Larousse*. URL : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/interface/43685>.
- 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, 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, 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. 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>.
- Méthode du canard en plastique* (2019). In : *Wikipédia*. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9thode_du_canard_en_plastique&oldid=156992828.
- 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. JSTOR : 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, Pierre GARMY et al. (2017). « Transition 5 : Modéliser Les Mutations Territoriales de l'âge Du Fer Dans Le Midi de La Gaule (VIe-Ve Siècles Av. J.-C.) » In : SANDERS, Lena. *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles. Perspectives Villes et Territoires*. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 213-242. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10587>.
- NUNINGER, Laure, Lena SANDERS 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 (2017). « Transition 6 Dite « Romanisation » (IIe Siècle Av. J.-C. - Ier Siècle Apr. J.-C.) ». In : SANDERS,

-
- Lena. *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 243-271. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10605>.
- OURIACHI, Marie-Jeanne, Hélène MATHIAN et al. (2017). « De l'élaboration de La Transition à Sa Modélisation : Retours Interdisciplinaires Sur l'expérience TransMon-Dyn ». 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*. 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*. 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*. Hermès 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>.
- PREMO, LS (2010). « Equifinality and Explanation : The Role of Agent-Based Modeling in Postpositivist Archaeology ». In : *Simulating Change : Archaeology into the Twenty-First Century*. University of Utah Press, Salt Lake City, p. 28-37.
- PUMAIN, Denise (1997). « Pour Une Théorie Évolutive Des Villes ». In : *Espace géographique* 26.2, p. 119-134. DOI : 10.3406/spgeo.1997.1063.
- (2004). *Modèle Gravitaire - Hypergeo*. URL : <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article76>.
- (2005). « Cumulativité Des Connaissances ». In : *Revue européenne des sciences sociales. European Journal of Social Sciences* XLIII.131, p. 5-12. DOI : 10.4000/ress.357. URL : <http://ress.revues.org/357>.
- PUMAIN, Denise, Romain REUILLOU et al. (2017). « 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 Thérèse SAINT-JULIEN (2001). « Les Interactions Spatiales ». In : *Armand Colin*, Paris, p. 19-31.

- PUMAIN, Denise, Lena SANDERS, Thérèse LIBOUREL et al. (2017). « 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>.
- PUMAIN, Denise, Lena SANDERS et Thérèse SAINT-JULIEN (1989). *Villes et Auto-Organisation*. Avec la coll. d'Ilya PRIGOGINE. Economica. 191 p.
- PUMAIN, Denise, Clara SCHMITT et Sébastien REY-COYREHOURCQ (2017). « Transition 4 : Modéliser l'émergence Des Villes ». In : SANDERS, Lena. *Peupler La Terre : De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais, p. 193-211. URL : <http://books.openedition.org/pufr/10578>.
- PUMAIN, Denise, Elfie SWERTS et al. (2015). « Multilevel Comparison of Large Urban Systems ». In : *Cybergeo : European Journal of Geography*. DOI : 10.4000/cybergeo.26730.
- 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>.
- RAIMBAULT, Juste et al. (2019). « Space Matters : Extending Sensitivity Analysis to Initial Spatial Conditions in Geosimulation Models ». In : *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 22.4, p. 10. DOI : 10/ggf2kb. URL : <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/22/4/10.html>.
- REUILLO, 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>.
- REUILLO, Romain, Clara SCHMITT 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.
- REY-COYREHOURCQ, Sébastien et al. (2017). « Vers Une Recherche Reproductible Dans Un Cadre Interdisciplinaire : Enjeux et Propositions Pour Le Transfert Du Cadre Conceptuel et La RéPLICATION Des Modèles ». In : *Peupler La Terre. De La Préhistoire à l'ère Des Métropoles*. Sous la dir. de Sanders L. Villes et Territoires. Presses universitaires François Rabelais, p. 409-434. DOI : 10.4000/books.pufr.10647. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01677950>.
- 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. 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>.
- ROBERT, Paul, Josette REY-DEBOVE et Alain REY (1993). *Le Nouveau Petit Robert*. le Robert.
- RODIER, Xavier (2000). « Le Système d'information Géographique TOTOPI : TOpographie de TOurs Pré-Industriel ». In : *Les petits cahiers d'Anatole* 4, 28600-signes.
- RODIER, Xavier, Christian GRATALOUP et Corinne GUILLOTEAU (2010). « Dossier Chrono-Chorématique Urbaine ». In : *Mappemonde* 100, p. 105. URL : https://mappemonde-archive.mgm.fr/dos_chrono.html.
- 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. 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*. 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*.
- 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, Anne BRETAGNOLLE et al., éd. (2020). *Les concepts-clés des systèmes de peuplement sur le temps long*. Perspectives Villes et Territoires. Tours : Presses universitaires François-Rabelais.
- SANDERS, Lena, Thérèse LIBOUREL et al. (2017). « 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 universitaires 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.
- SCHELLING, Thomas C. (1971). « Dynamic Models of Segregation ». In : *Journal of mathematical sociology* 1.2, 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 Denise PUMAIN (2013). « Modélographie multi-agents de la simulation des interactions sociétés-environnement et de l'émergence des villes ». In : *Cybergeo : European Journal of Geography*. DOI : 10.4000/cybergeo.25900. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/25900>.
- SCHMITT, Clara, Sébastien REY-COYREHOURCQ 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. 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.
- Snowflake Schema* (2018). In : Wikipedia. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Snowflake_schema&oldid=856363739.
- Star Schema* (2018). In : Wikipedia. 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.
- STOLPER, C. D., A. PERER et D. GOTZ (2014). « Progressive Visual Analytics : User-Driven Visual Exploration of in-Progress Analytics ». In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 20.12, p. 1653-1662. DOI : 10/f3tvrv.
- TAILLANDIER, Patrick et al. (2018). « Building, Composing and Experimenting Complex Spatial Models with the GAMA Platform ». In : *GeoInformatica*. DOI : 10/gfw9nz. 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. DOI : 10/gfj2tj.
- 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 Méridional 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. 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.
- TURKAY, Cagatay et al. (2018). « Progressive Data Science : Potential and Challenges ». In : arXiv : 1812.08032 [cs]. URL : <http://arxiv.org/abs/1812.08032>.
- VARENNE, Franck (2013). « Modèles et Simulations Dans l'enquête Scientifique : Variétés Traditionnelles et Mutations Contemporaines ». In : *Varenne, Franck y Marc Siberstein, Epistemologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, París : Éditions Matériologiques.
- 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*, 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*. 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/cq54bb. 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/dpf8m2. URL : <http://epb.sagepub.com/lookup/doi/10.1068/b240323>.
- WICKHAM, Hadley (2016). *Ggplot2 : Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer.

-
- (2017). « Tidyverse : Easily Install and Load 'tidyverse' Packages ». In : *R package version 1.1*.
 - WICKHAM, Hadley et al. (2015). « Dplyr : A Grammar of Data Manipulation ». In : *R package version 0.4.3*.
 - WILKINSON, Leland (2006). *The Grammar of Graphics*. Springer Science & Business Media.
 - YU, Chong Ho (1994). « Abduction ? Deduction ? Induction ? Is There a Logic of Exploratory Data Analysis ? » In : Annual Meeting of American Educational Research Association. New Orleans, Louisiana, p. 28. URL : <https://eric.ed.gov/?id=ED376173>.
 - 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*, 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. 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. 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>.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Modélisation et visualisation à l'interface entre les disciplines	9
Introduction	10
1.1 Parcours scientifique et professionnel : vers la modélisation en géographie	11
1.1.1 Une formation de géographe	11
1.1.2 Une approche méthodologique de géomaticien	12
1.1.3 La modélisation comme domaine de confluence entre la géographie quantitative et la géomatique	14
1.2 Modéliser l'espace sur le temps long : un travail d'interdisciplinarité	17
1.2.1 Modélisation de processus spatiaux	17
1.2.2 Appréhender des processus inscrits dans la longue durée	19
1.2.3 Un contexte fortement interdisciplinaire	21
1.3 Conditions et modalités de la modélisation collective et interdisciplinaire	26
1.3.1 Position du modélisateur : du guide au co-constructeur	26
1.3.2 Explorer plutôt que confronter des données empiriques et simulées	29
1.3.3 D'un méta-modèle à un retour sur expérience de modélisation .	31
1.4 Programme de recherche : visualiser et explorer pour co-construire un modèle par la conception d'interfaces exploratoires	33
1.4.1 Favoriser une co-construction interdisciplinaire	33

1.4.2	Mettre en place des interfaces disciplinaires	36
1.4.3	S'engager dans une démarche exploratoire	40
1.4.4	Poursuivre une démarche reproductible	42
	Conclusion	46
2	Formaliser connaissances et hypothèses, vers un modèle de simulation co-construit : SimFeodal	49
	<i>Avant-propos</i>	50
	Introduction	52
2.1	Objectifs du modèle SimFeodal – <i>Purpose</i>	54
2.1.1	Contexte historiographique	54
2.1.2	Questionnement	55
2.2	Entités et échelles – <i>Entities, state variables, and scales</i>	57
2.2.1	Entités	57
2.2.2	Échelles spatiales et temporelles	61
2.3	Fonctionnement général – <i>Process overview and scheduling</i>	65
2.3.1	Initialisation	66
2.3.2	Variables globales	67
2.3.3	Renouvellement des foyers paysans	67
2.3.4	Mise à jour du maillage paroissial	67
2.3.5	Détection des Pôles	69
2.3.6	Satisfaction des Foyers Paysans	70
2.3.7	Migration des Foyers Paysans	71
2.3.8	Gains de droits	72
2.3.9	Collecte des droits	72
2.3.10	Dons entre seigneurs	73
2.3.11	Construction et promotion des châteaux	74
2.3.12	Création de nouveaux seigneurs	76
2.3.13	Détection des agrégats	76
2.3.14	Actualisation des pôles	77

2.3.15 Enregistrement des <i>outputs</i>	78
2.4 Concepts de modélisation – <i>Design concepts</i>	79
2.4.1 Principes de base - <i>Basic principles</i>	79
2.4.2 Théories et concepts de la modélisation agents mobilisés	81
2.5 Situation initiale – <i>Details - Initialisation</i>	85
2.5.1 Une situation initiale théorique et générée de manière endogène	85
2.5.2 Paramètres d'initialisation	87
2.6 Données en entrée – <i>Input data</i>	89
2.7 Mécanismes spécifiques – <i>Submodels</i>	90
2.7.1 Introduction	90
2.7.2 Mécanismes globaux	92
2.7.3 Foyers paysans	96
2.7.4 Seigneurs	100
Conclusion	105
3 Évaluer et paramétrier un modèle de simulation complexe en situation d'interdisciplinarité	107
Introduction	108
3.1 Comment évaluer un modèle ?	109
3.1.1 Évaluation, validation, vérification...	110
3.1.2 Les étapes de l'évaluation d'un modèle	113
3.1.3 Une évaluation de la plausibilité d'un modèle : la « <i>face validation</i> »	119
3.1.4 Vers une évaluation visuelle	128
3.2 Une grille d'analyse composée d'indicateurs de sortie	132
3.2.1 Indices et indicateurs	132
3.2.2 Hiérarchiser et catégoriser les indicateurs	138
3.2.3 Les indicateurs et dimensions de SimFeodal	142
3.3 Paramétrage du modèle SimFeodal	151
3.3.1 Les paramètres	151
3.3.2 Le paramétrage	162

Conclusion	180
4 Explorer visuellement des données de simulation massives pour analyser le comportement d'un modèle.	181
Introduction	182
4.1 Capter les sorties de SimFeodal	183
4.1.1 Masse des données	183
4.1.2 Tenir compte de la stochasticité du modèle - les réplications	187
4.1.3 Des réplications aux expériences	189
4.1.4 Des données aux indicateurs	190
4.2 Comment explorer les sorties de SimFeodal ?	192
4.2.1 Observer les simulations en direct ou <i>a posteriori</i>	192
4.2.2 Générer les indicateurs	196
4.2.3 Organiser les indicateurs en rapports paramétrables	198
4.2.4 Organiser les rapports : les <i>dashboards</i>	202
4.2.5 Interagir avec les rapports : exploration interactive	207
4.2.6 Explorer en comparant : la plateforme SimEDB	211
4.3 Organiser les données	215
4.3.1 Assurer la capacité d'interrogation des données	215
4.3.2 Structuration des données de SimFeodal	229
4.4 Une plateforme d'exploration de données de simulations : SimEDB	237
4.4.1 Contraintes	237
4.4.2 Construire une plateforme interactive pour l'exploration de sorties de simulation	246
Conclusion	262
Après-propos	262
5 Exploration du comportement de SimFeodal	263
Introduction	264
5.1 Calibrage du modèle et premiers résultats	265
5.1.1 Calibrage du modèle	265

5.1.2 Résultats des simulations	273
5.1.3 Après le calibrage, comment affiner le modèle ?	287
5.2 Analyser la sensibilité de SimFeodal	290
5.2.1 Méthodologie - Analyse visuelle de sensibilité.	291
5.2.2 Sélection des paramètres à analyser.	301
5.2.3 Évaluation visuelle de la sensibilité	306
5.2.4 Analyser la sensibilité à l'aléa	318
5.2.5 Quels apports de l'analyse visuelle de sensibilité ?	321
Conclusion	323
6 Retours sur la co-construction et l'exploration d'un modèle en situation d'interdisciplinarité	325
Introduction	326
6.1 L'analyse exploratoire de données issues de simulation, une approche aux possibilités multiples	327
6.1.1 L'analyse exploratoire de données, un cadre théorique et méthodologique adapté à l'exploration de toutes les données spatiales et spatio-temporelles	327
6.1.2 Construction de connaissances par l'exploration visuelle d'un modèle	332
6.1.3 Comment passer de l'exploration à la validation ? Quelques perspectives	335
6.1.4 Conclusion : Pour un recours systématique à la visualisation dans l'analyse de modèles	339
6.2 Retours sur la co-construction d'un modèle de simulation descriptif	340
6.2.1 Un retour d'expérience critique sur l'usage de modèles de simulation descriptifs : les limites de l'implémentation	340
6.2.2 Quelle part effective du collectif dans la conception et l'implémentation du modèle ?	343
6.2.3 La trajectoire du modèle SimFeodal	346
6.2.4 Conclusion : Modéliser avec et pour les autres.	352
Conclusion	353
Conclusion générale	355

Annexes	362
A Les paramètres de SimFeodal.	362
A.1 Niveau de précision des <i>inputs</i>	362
A.2 Définition et valeur des paramètres.	362
A.3 Valeurs de paramètres employées dans l'analyse de sensibilité.	367
B Un exemple de rapport automatique des sorties de SimFeodal.	373

Table des figures

1.1	Le « champignon informationnel », d'après KAPLAN (2013).	20
1.2	Le « positionnement d'interface disciplinaire entre l'archéologie urbaine et la géographie théorique et quantitative » de GRAVIER (2018)	37
1.3	« L'ontologie comme médiateur d'un dialogue » de PHAN (2014)	38
1.4	Les paliers de réplicabilité d'un modèle de simulation et de son exploration.	43
2.1	Interactions des agents : seigneurs et foyers paysans.	57
2.2	Constitution des pôles d'attraction et des paroisses.	59
2.3	Héritages et compositions des agents de SIMFEODAL.	59
2.4	L'espace support de SIMFEODAL, un monde théorique.	62
2.5	Frise chronologique des processus historiques observés en Touraine implémentés dans SIMFEODAL.	64
2.6	Ordonnancement des mécanismes de SIMFEODAL.	65
2.7	Étapes successives de l'initialisation des foyers paysans agrégés (petites villes et villages).	86
2.8	Détection des agrégats et identification de leur « héritage ».	93
2.9	Les étapes du mécanisme de détection et de calcul d'attractivité des pôles.	94
2.10	Quatre exemples de paroisses insatisfaisantes.	95
2.11	Promotion d'églises paroissiales avec églises non paroissiales.	95
2.12	Promotion et création d'églises paroissiales dans des paroisses n'ayant initialement pas d'églises sans droits paroissiaux.	96

2.13 Variation de la satisfaction en fonction de la distance à l'attracteur le plus proche.	97
2.14 Migrations locales et lointaines.	99
2.15 Décision de migration.	100
2.16 Décision de migration des foyers paysans dépendants.	100
2.17 Prélèvement des droits fonciers par les petits et grands seigneurs.	101
2.18 Mécanisme général de prélèvement des droits par les seigneurs.	102
2.19 Mécanisme de localisation des châteaux construits.	103
3.1 Représentation schématique du cycle de modélisation et de la typologie des termes relatifs à l'évaluation de modèle.	111
3.2 Une esquisse de procédure générale de validation de modèles de simulation à base d'agents.	113
3.3 Procédure générale de validation d'un modèle à base d'agents.	113
3.4 Relation entre autisme et utilisation de glyphosate.	120
3.5 Relation entre autisme et vente d'aliments « bio ».	120
3.6 Part des étapes de la cycle de vie d'un modèle pour lesquelles différentes méthodes de « VV&T » peuvent être mobilisées.	127
3.7 Schéma de synthèse des correspondances entre mesures empiriques et simulées.	133
3.8 Les variables d'un modèle de simulation selon BALCI	156
3.9 Les entrées : variables et paramètres.	157
3.10 Les sorties : variables et indicateurs.	158
3.11 Organisation des entrées et sorties du modèle.	159
3.12 Variation des paramètres entre les expériences.	160
3.13 Étapes du processus de modélisation.	165
3.14 Temporalité du paramétrage du modèle.	171
3.15 Méthodologie d'agrégation des <i>commits</i>	177
3.16 Une exploration visuelle du rythme des changements de SIMFEODAL.	177
4.1 Indicateurs intégrés à l'interface graphique interne de SIMFEODAL.	195
4.2 Visualisation intégrée à l'interface graphique interne de SIMFEODAL.	196
4.3 Un exemple de rapport automatique généré pour SIMFEODAL.	199

4.4 Un exemple de représentations visuelles courantes dans les <i>dashboards</i>	204
4.5 Pseudo-codes du rapport automatique (gauche) et du dashboard correspondant (droite).	205
4.6 Première interface de SimVADB, un <i>dashboard</i> dédié à la visualisation des indicateurs de sorties de simulation de SIMFEODAL.	206
4.7 Construction d'un graphique en coordonnées parallèles et sélection interactive.	209
4.8 Utilisation des graphiques en coordonnées parallèles dans SimVADB pour explorer visuellement les indicateurs de sortie de simulation de SIMFEODAL.	210
4.8 exemple	211
4.9 La comparaison d'expériences dans SIMEDB	214
4.10 Comparaison de la performance de différents SGBD sur un jeu de données test de 100 millions de lignes.	226
4.11 Impact du temps de chargement d'un site web sur sa consultation.	228
4.12 Modèle Conceptuel de Données (MCD) des données en sortie de simulation de SIMFEODAL telles qu'implémentées dans SIMEDB.	232
4.13 De la sélection interactive à l'indicateur de sortie.	235
4.14 « <i>An update to Cartography3, 10 years after its conception</i> ».	238
4.15 Positionnement de SIMEDB dans le cube <i>Cartography³</i> de MACEACHREN. .	239
4.16 « <i>Interface complexity versus user motivation.</i> ».	239
4.17 Un exemple de manipulation de données stockées dans un SGBD depuis R.	250
4.18 Les éléments de grammaire de ggplot2.	250
4.19 Un exemple de production de graphique avec ggplot2.	251
4.20 « <i>The Visualisation Pipeline</i> ».	252
4.21 Le « pipeline » de visualisation et son implémentation dans SIMEDB. . .	253
4.22 Une conception modulaire.	254
4.23 Comparaison visuelle de SimVADB et SIMEDB.	255
4.24 La barre de contrôleurs dans l'interface de SIMEDB.	256
4.25 Le menu de sélection des expériences.	259
4.26 Utilisation interactive de SIMEDB et redimensionnement du panneau de contrôle.	260

5.1	Influence du paramètre nb_tirages sur le nombre de châteaux.	271
5.2	Évolution du nombre de châteaux simulé par le modèle calibré.	271
5.3	Détail de la composition des châteaux en fin de simulation à l'issu du calibrage de SIMFEODAL.	272
5.4	Concentration des foyers paysans.	275
5.5	Nombre d'agrégats.	275
5.6	Nombre de pôles et part des agrégats comprenant un pôle.	276
5.7	Dispersion spatiales des agrégats et pôles.	277
5.8	Hiérarchie des agrégats	278
5.9	Hiérarchie des pôles.	279
5.10	Organisation hiérarchique des paroisses.	280
5.11	Détail de la distribution hiérarchique des paroisses.	280
5.12	Migration des foyers paysans.	281
5.13	Satisfaction des foyers paysans.	282
5.14	Types de migration des foyers paysans.	283
5.15	Nombre de paroisses.	284
5.16	Densité des paroisses et des paroissiens.	284
5.17	Superficie des paroisses.	285
5.18	Couverture de la desserte paroissiale.	285
5.19	Construction et mise en page de planches graphiques dédiées à l'analyse visuelle de la sensibilité.	299
5.20	Analyse de la sensibilité globale de tous les paramètres de SIMFEODAL.	301
5.21	Partie de l'interface de SIMEDB dédiée à l'exploration visuelle des résultats de l'analyse de sensibilité de SIMFEODAL.	304
5.22	Sensibilité à la taille du monde simulé.	306
5.23	Sensibilité du paramètre dist_minmax_eglise.	307
5.24	Sensibilité du paramètre rayon_migration_locale_fp.	308
5.25	Sensibilité du paramètre croissance_demo.	308
5.26	Nombre et organisation des agrégats dans le scénario D2.	312
5.27	Sensibilité des paramètres liés aux agrégats.	313
5.28	Sensibilité des paramètres liés aux seigneurs.	314

5.29 Sensibilité du paramètre periode_promotion_chateaux.	316
5.30 Sensibilité du paramètre nb_tirages_chateaux_ps.	316
5.31 Sensibilité du paramètre debut_construction_chateaux.	316
5.32 Sensibilité du paramètre de pondération de création de nouvelles pa- roisses dans les agrégats.	318
5.33 Sensibilité à l'aléa selon les indicateurs.	320
5.34 Paramètres présentant des sensibilités atypiques à l'aléa.	320
6.1 Visualisation de différentes méthodes de résumés statistiques, sur les dimensions réplicatives et temporelles, avec le logiciel VISUAGENT. . .	331
6.2 Deux cas théoriques d'évolution spatio-temporelle très similaires mais non agrégables.	332
6.3 Itérations entre modèles et visualisations pour enrichir les connaissances.	334
6.4 Trois approches de modélisation différentes de processus sociaux et spa- tiaux sur le temps long.	337
6.5 Un exemple de sur-ajustement d'une série de points avec l'augmentation du degré d'une suite de régressions polynomiales.	341
6.6 Une « classification des approches de modélisation » de modèles géogra- phiques.	347
6.7 Une proposition de « TransModélographie ».	348
6.8 La trajectoire du modèle SIMFEODAL, dans le « fer à cheval » de BANOS et SANDERS (2013).	351

Liste des tableaux

1.1	Les 12 cas d'étude, ou « transitions », du projet TransMonDyn.	18
2.1	Les éléments du protocole ODD.	51
2.2	Les différents types d'agents de SIMFEODAL.	60
2.3	Paramètres permettant de contrôler l'initialisation du monde de SIMFEODAL.	88
2.4	Attractivité conférée aux pôles par leurs attracteurs.	94
2.5	Gain de puissance par foyer paysan prélevé.	101
3.1	Historique des versions de SimFeodal.	174
4.1	Multiplication des données et indicateurs selon la hiérarchie des simulations.	184
4.2	Une sélection de différents <i>frameworks</i> dédiés à la création d'interfaces d'exploration de données.	248
5.1	Valeurs des indicateurs numériques en fin de simulation.	274
5.2	Les indicateurs de sortie de simulation quantitatifs de SIMFEODAL. . . .	295
5.3	Paramètres sélectionnés pour l'analyse visuelle.	305
5.4	Valeurs des indicateurs numériques du scénario D2 en fin de simulation.	311
5.5	Dispersion des indicateurs de sortie de SIMFEODAL.	318
6.1	Caractérisation des données intermédiaires dans le spectre des données. .	329

Liste des encadrés

2.1	Un modèle inscrit dans un vif débat historiographique	54
2.2	Écarts entre présentation et implémentation	90
3.1	Évaluation, validation interne et externe	112
3.2	Incrémentalité des indicateurs	141
3.3	Quatre types de paramètres	161
3.4	Construction, paramétrage et calibrage	165
3.5	Paramétrage du modèle gravitaire	166
3.6	Paramétrage du modèle de ségrégation de Schelling	167
4.1	Construction et utilisation interactive d'un graphique en coordonnées parallèles	209
4.2	Un exemple d'interrogation de la base de données de SimEDB.	235
5.1	Différencier indicateurs contextuels et émergents.	294
5.2	Un scénario thématique pour tester l'hypothèse de croissance démographique	310

Modéliser des systèmes de peuplement en interdisciplinarité. Co-construction et exploration visuelle d'un modèle de simulation.

Résumé

Cette thèse vise à expérimenter une démarche collective et interdisciplinaire d'analyse de dynamiques spatiales sur le temps long, en se fondant sur la co-construction et l'exploration visuelle d'un modèle de simulation des transitions des systèmes de peuplements. Il s'agit de simuler les transformations du système de peuplement Nord-Ouest européen entre 800 et 1100, période de transition d'un système majoritairement dispersé à un système hiérarchisé et polarisé. L'objectif est de modéliser et d'analyser les interactions à différentes échelles qui ont provoqué ces transformations et engendré les dynamiques de polarisation, de hiérarchisation et de fixation de l'habitat.

Pour répondre à cet objectif, la thèse déploie une démarche méthodologique de co-construction d'un modèle de simulation avec des modélisateurs et des experts thématiciens archéologues, historiens et géographes. Cette démarche permet d'accompagner les thématiciens dans la modélisation conceptuelle et informatique du système étudié, via le développement du modèle à base d'agents SIMFEODAL. Le modèle est collectivement évalué, paramétré et exploré grâce à la mise en œuvre d'une méthode d'évaluation visuelle. On peut alors tester les hypothèses sous-jacentes aux processus mobilisés pour décrire les dynamiques spatiales modélisées en comparant systématiquement les sorties du modèle. La comparaison est rendue possible par l'utilisation d'un environnement d'exploration, la plateforme SIMEDB. Cet outil interactif conçu spécifiquement pour cet usage permet l'exploration des données spatio-temporelles massives issues du modèle, et facilite ainsi l'analyse collective et interdisciplinaire des hypothèses thématiques.

Mots-clés : modélisation à base d'agents ; visualisation ; systèmes de peuplement ; temps long ; interdisciplinarité ; SimFeodal ; SimEDB.

Interdisciplinary modelling of settlement systems through the collective co-construction and visual analysis of a simulation model.

Abstract

This thesis experiments a collaborative and interdisciplinary approach for the analysis of long-term spatial dynamics, based on the collective construction and visual exploration of a model which simulates the transitions of a settlement system. The case study is the Northwest European settlement system which between 800 and 1100 transitioned from a mostly dispersed settlement system to a hierarchical and polarized one : the objective of this research is to model and analyse the multiscalar interactions that resulted in these transformations and generated the dynamics of polarisation, hierarchisation and settlement fixation.

To this end, this thesis proposes a methodological approach based on the co-construction of a simulation model involving experts from various disciplines (archaeology, history and geography). This approach proposes to support the domain experts for conceptualizing and modelling the system under study, through the development of SIMFEODAL, an agent-based model. This model is collectively evaluated, parameterized and explored through methods of visual evaluation. The methods rely on the systematic comparison of the model's outputs to test the thematic hypothesis underlying the choice and selection of processes which simulates the settlement system's spatial dynamics. The SIMEDB platform, specifically designed for this use, provides an interactive tool to explore the massive spatio-temporal datasets of the model, and thus facilitates the collective and interdisciplinary analysis of the thematic hypotheses.

Keywords : agent-based modeling, visualization, settlement systems, long term, interdisciplinarity, SimFeodal, SimEDB.