

Cenu rendu
le 12/09/201

6.1.3 Résultats du modèle 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^[L1], 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 (sur la résolution temporelle modélisée^[L2]) tend peu à peu à se fixer, c'est-à-dire à trouver une localisation dans laquelle leur satisfaction ne diminuera plus. Cette fixation, dans des agrégats, doit paradoxalement s'assortir^[L3] d'une dispersion dans l'espace des agrégats : 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. Ce lien direct^[L4] permet d'accéder aux résultats spécifiques à la version présentée ici : [LIEN direct](#)

6.1.3.1 Résumé global des résultats

Avant de chercher à analyser de manière approfondie les résultats du modèle, le tableau 6.2 peut déjà synthétiser une bonne part des résultats agrégés, en fin de simulation.

On y lit en premier lieu une sur-représentation nette de la plupart des objectifs quantitatifs^[L5]. Le nombre d'agrégat et d'églises paroissiales, entre autre, est trop important, et sa variabilité suffisamment faible pour que cette sur-représentation puisse être considérée comme significative. Le taux de foyers paysans isolés en fin de simulation est lui trop faible par rapport aux attentes, quand bien même l'intervalle de confiance empirique est assez flou.

Bien que ces résultats soient systématiquement éloignés de des objectifs, on notera tout de même que les ordres de grandeur sont relativement respectés, à l'exception peut-être de la distance entre églises paroissiales. Dans ce dernier cas, dont la concentration d'églises e certains au sein des agrégats ne peut que fausser la valeur moyenne de cette mesure.

*l'air de
supérieur de
l'ensemble*

Indicateur	Valeur attendue ¹¹	Moyenne	Médiane	Q1	Q3	Écart- type
Agrégats	200	249	248	244	253	10.45
Châteaux	50	49	49	47	51	5.82
Gros châteaux	10	15	15	13	17	2.87
Seigneurs	200	198	196	191	204	8.79
Églises paroissiales	300	348	348	338	359	12.96
Distance moyenne entre églises	3 000 m	1 459 m	1 456 m	1 391 m	1 537 m	97 m
Part de foyers pay- sans isolés	20 %	30 %	30 %	30 %	30 %	0.8 %
Augmentation de la charge fiscale des foyers paysans	x 3	x 2.4	x 2.4	x 2.4	x 2.5	x 0.03
Nombre de Foyers Paysans	—	40 000	40 000	40 000	40 000	0
Densité de popula- tion	—	6.25	6.25	6.25	6.25	0

Tableau 6.2 – Valeurs simulées des Indicateurs numériques à partir de la version 6.6 de SimFeodal.

Introduire la suite, les résultats plus précis.

6.1.3.2 Polarisation des foyers paysans

Les résultats mettent en évidence une forte concentration des foyers paysans, dont la part de foyers isolés diminue de manière importante, d'environ 90% à 30% en fin de simulation (figure 6.4). d'ensemble ne sont pas entièrement satisfaisants, mais on y constate tout de même une forte concentration des foyers paysans, dont la part de foyers isolés diminue de manière importante, d'environ 90% à 30% en fin de simulation (figure 6.4). [L6]

idem

Évolution de la part de foyers paysans isolés
Variabilité : Réplications

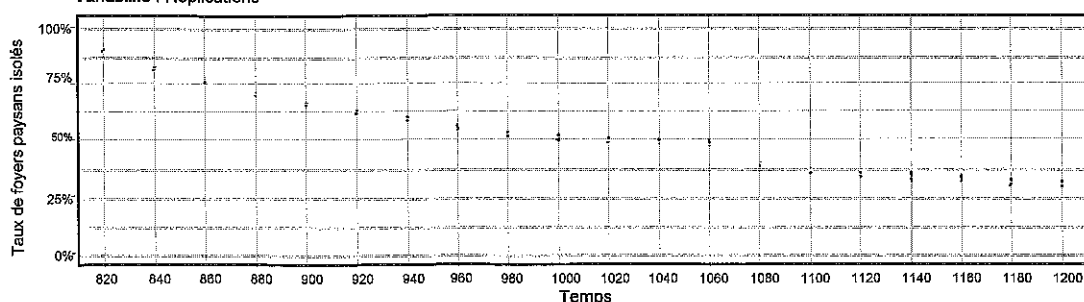


Figure 6.4 – Concentration des foyers paysans

Cette diminution paraît assez régulière, en dépit d'une légère rupture de tendance entre 1060 et 1080, période qui correspond dans le modèle à une évo-

11. Objectif en fin de simulation

Rendu Lena
12/09/2019
(papier).

lution du seuil de satisfaction religieuse. Notons que parmi les 20 répliques étudiées, cet indicateur se montre extrêmement stable, les marques visuelles de variabilité étant à peine visibles.

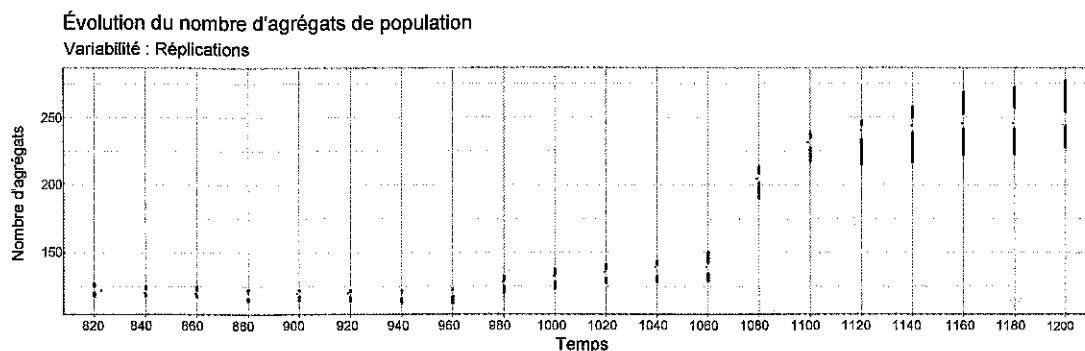


Figure 6.5 – Nombre d'agrégats.

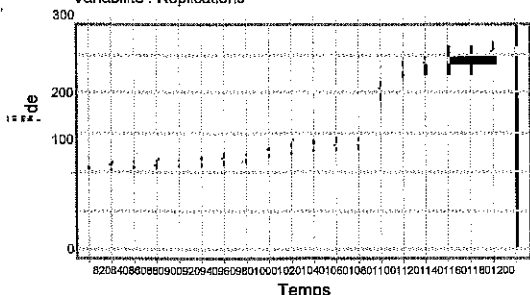
La concentration des foyers paysans s'effectue à destination d'un nombre croissant d'agrégats (figure 6.5), nombre quant à lui bien plus affecté par l'effet de seuil en 1060 noté dans la concentration [L7]. On y retrouve les trois régimes estimés empiriquement, c'est-à-dire une augmentation lente, suivie d'une augmentation rapide et enfin une stabilisation du nombre d'agrégats.

Pour pouvoir parler de polarisation et pas seulement de concentration, il faut que le modèle soit en mesure non seulement de concentrer les foyers paysans dans des agrégats, mais aussi que ces agrégats se constituent autour des différents attracteurs du modèle (églises paroissiales, châteaux et agrégats dotés de communautés paysannes). Dans cette version du modèle, on constate bien une croissance des pôles (figure 6.6-a), assez semblable à celle des agrégats en termes de rythme et de valeurs. Par rapport à la version 0 commentée dans le chapitre 3, les valeurs sont très satisfaisantes, qui plus est au regard de l'évolution de la répartition des pôles, qui parviennent très rapidement (peut-être même trop) à la création d'agrégats dans leur voisinage (figure 6.6-b).

terminé après
on en reparle

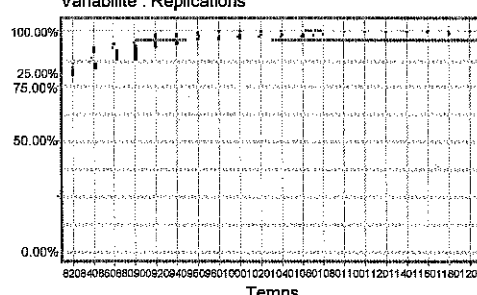
2^e phase

Évolution du nombre de pôles d'attractions
Variabilité : Répliques



(a)

Évolution du taux d'agrégats avec pôle
Variabilité : Répliques



(b)

Figure 6.6 – Nombre de pôles et part des agrégats comprenant un pôle.

Ces agrégats et les pôles correspondant sont bien plus dispersés dans l'espace du modèle que dans la version 0, et on constate, au moins visuellement, que le semis des pôles se confond avec celui des agrégats (figure 6.7). Sur ces cartes, on constate une occupation importante de l'espace, largement due à une population bien supérieure en version 6.6 (40 000 foyers paysans, contre

ça ne va pas
de la phase
précédente...
carte ?
suite ? On s'embrouille
ici tout est indigne
that

6.1.3.3 Hiérarchisation du système de peuplement *(à éluc.)*

Les dernières figures étudiées montraient une forte hétérogénéité dans la taille des agrégats, ce qui est constitué déjà un indice sur la hiérarchie de ces concentrations locales de foyers paysans. *donc le niv. de hiérarchisation*

Comme indiqué dans le chapitre 3, il est difficile d'avoir des mesures précises de la hiérarchie attendue dans le système de peuplement. Les différentes sources historiques divergent aussi bien sur les quantités absolues que sur la forme des distributions. Rappelons tout de même que les sources s'accordent sur une nette hiérarchisation qui doit tendre vers les formes log-normales que l'on retrouve dans les sociétés contemporaines. *avec une distribution* *Elh*

	Nombre de foyers paysans					
	<100	101-200	201-300	301-400	401-600	>600
Nombre moyen	142	78	18	7	4	2
Taux moyen	56.8%	31.4%	7%	2.9%	1.6%	<0.1%
Objectif (taux)	?	?	?	?	?	?

Tableau 6.3 – Distribution des agrégats par classe de taille en fin de simulation. Ne conserver que si Cécile arrive à trouver, pour l'article anglais, une validation des objectifs par EZR/SL.

Évolution de la distribution rang-taille des agrégats de population
Variabilité : Moyenne, Q1 et Q3 des Répliques

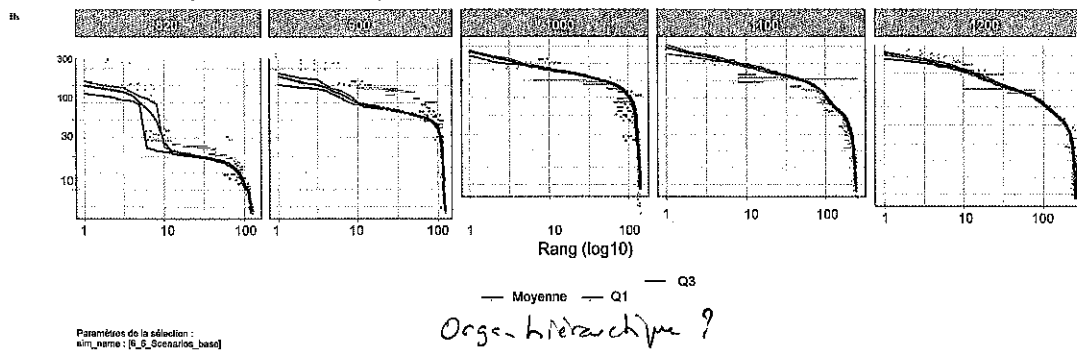


Figure 6.8 – Hiérarchie des agrégats. *Org. hiérarchique ?*

La figure 6.8 montre une claire hiérarchisation des agrégats : la courbe se « redresse » au cours du temps simulé, marque d'une pente croissante. Les valeurs absolues augmentent aussi : les plus gros agrégats voient leur population croître. Le « coude » dans la courbe, correspondant à la longue traîne de petits agrégats, se réduit, mais on constate tout de même que le bas de la hiérarchie se renforce. Contrairement à la version 0 du modèle, la croissance de tous les agrégats semble constante, et on ne remarque pas, visuellement, les tendances à l'éclatement des gros agrégats qui caractérisaient la hiérarchie de cette version.

En parallèle de cette nette hiérarchisation des agrégats, les graphiques de la figure 6.9 permettent de constater une toute aussi nette hiérarchisation des pôles. Cela n'est pas surprenant dans la mesure où on a vu qu'agrégats et pôles se confondaient, ce qui constitue en soi un résultat satisfaisant. La mesure représentée dans cette première figure, le nombre d'attracteurs de chaque

de la simul ?

Comment on voit ?

Le fait est déjà difficile. En regardant ce qui a travaillé la comp. avec la Vo ?

pôle, est beaucoup plus discriminante et discrète que le nombre de foyers pay-sans des agrégats. La courbe en est donc d'autant plus évidente, montrant une forte hiérarchisation qui s'assortie d'une hausse importante du nombre maxi-mum d'attracteurs des pôles les plus importants. Cela montre bien l'apparition d'une tête de hiérarchie urbaine dans le modèle, qui trouve une correspon-dance dans les villes (Amboise, Loches, Chinon...) de la région d'étude, or-ganisées autour de châteaux et composées de multiples églises paroissiales. La figure 6.9-b montre aussi cette hiérarchisation : elle met en évidence un glissement des modalités d'attraction depuis une valeur de 0.2 (deux églises paroissiales) à un double mode à 0.4 (deux églises et une communauté) et 0.7 (plusieurs églises, un château, une communauté...).

mal valorisé
car le lecteur n'a
pas forcément
compris le schéma
6.9a

ou on voit
une ?

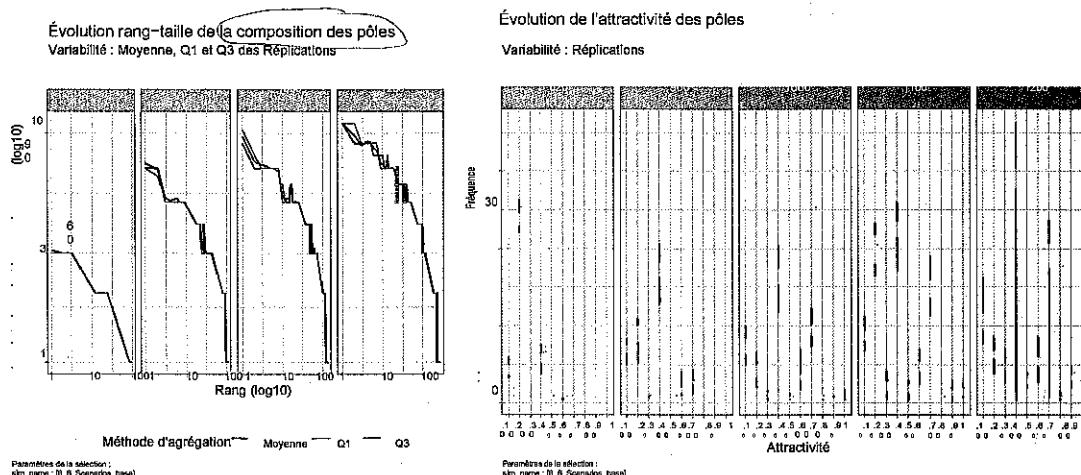


Figure 6.9 – Hiérarchie des pôles.

Dernier élément du modèle en lien avec la hiérarchisation du peuplement, les paroisses. Plutôt qu'une hiérarchisation, on cherche à y reproduire deux faits stylisés. En premier lieu, une large majorité des paroisses, que l'on pourrait nommer « rurales », doivent être peu fréquentées et viser surtout à une desserte équitable de la population. En second lieu, pour les paroisses « urbaines », on souhaite qu'elles aient un nombre de paroissiens bien supérieur à celui des paroisses rurales, tout en restant largement inférieur au millier de paroissiens. Dans les agrégats les plus peuplés, il doit en effet y avoir suffisamment de paroisses pour que les fidèles ne soient pas lésés.

mieux
formuler, à
chaque fois, la
objectif, la
situation que l'on
souhaitait reproduire
par simulation
de pas le
faire par
petit à coup

Dans les graphiques de la figure 6.10, on constate un phénomène inattendu, à savoir une tendance exactement inverse à celle des agrégats. La convexité de la courbe augmente au cours du temps simulé, et les valeurs décroissent régulièrement. En regardant le détail (figure 6.10-b), on peut remarquer que cela correspond en fait à une forte homogénéisation dans l'intervalle de 50 à 200 paroissiens. Cet intervalle correspond certainement aux paroisses rurales qui contiennent quelques agrégats ruraux de taille moyenne à faible (figure 6.8). On assiste bien à une 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.

non, pas exactement

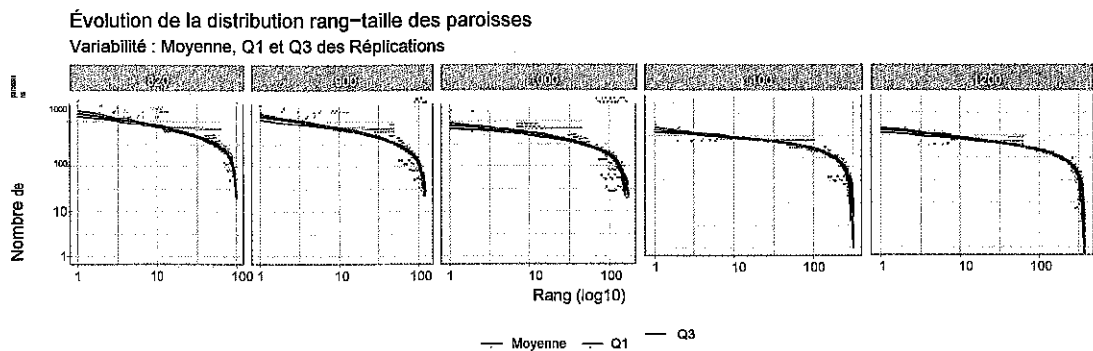
préciser

je vois pas

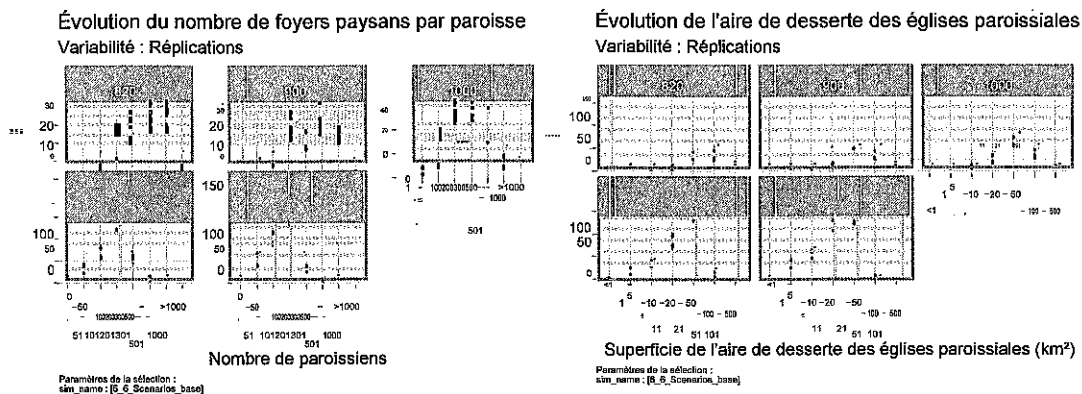
à mieux
valoriser !

et figurer les
petits

difficile à suivre



(a)



(b)

(c)

Figure 6.10 – Hiérarchie des paroisses.

! Attention ! les seuils sont complètement différents du chapitre 3.

comme c'est petit on ne voit pas grand chose

Dans l'ensemble, la hiérarchisation est certaine mais moins connue empiriquement que la polarisation du 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 bien les hypothèses estimées, quand bien même ces dernières sont assez floues au regard d'autres éléments empiriques. À ce stade de maturité du modèle, il faut 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.

trop d'A/R
sépare mieux
- info. sur les
surv
- les objets
- la répartition
de l'hab.
Le point 1
d'ailleurs = est
rép. ailleurs,
+ haut, pas néc.
d'y revenir ici,
d'j = se simplifierait.

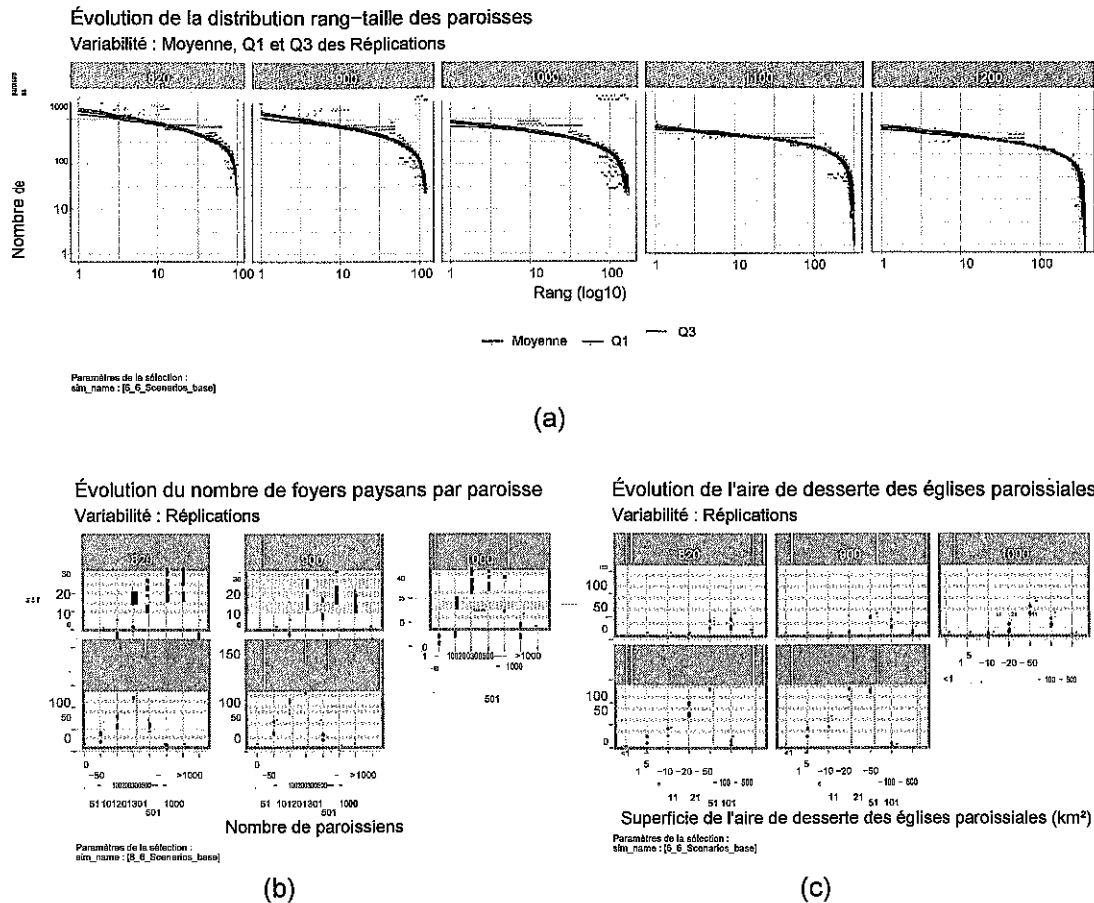


Figure 6.10 – Hiérarchie des paroisses.

! Attention ! les seuils sont complètement différents du chapitre 3.

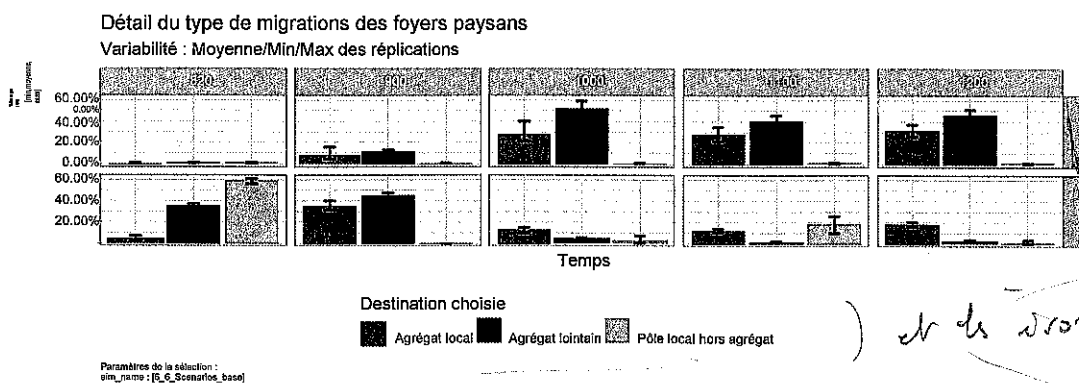
comme c'est petit on ne voit pas grand chose

Dans l'ensemble, la hiérarchisation est certaine mais moins connue empiriquement que la polarisation du 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 bien les hypothèses estimées, quand bien même ces dernières sont assez floues au regard d'autres éléments empiriques. À ce stade de maturité du modèle, il faut 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.

loup d'A/R
sépare mieux
- info. sur les
rues
- les objets
- la répartition
des sim.
Le point 1
d'ailleurs - c'est
rép. ailleurs,
+ haut, pas nec.
d'y revenir ici,
d'jà - se simplifierait.

Si l'on observe le détail des migrations (figure 6.13), on peut noter deux périodes. En 820 et en 900, la plupart des migrations proviennent de foyers paysans isolés. Ces migrations, locales et lointaines, permettent aux foyers paysans de rejoindre un agrégat, quel qu'en soit la place dans la hiérarchie. En 1000 et après, les foyers paysans isolés représentent encore une part substantielle de la population (50% d'après la figure 6.4), mais leur poids relatif dans les migrations est devenu bien plus faible que celui des migrations entre agrégats de population. Après une première période de concentration arrive une période de choix hiérarchique pour les foyers paysans, où les différences d'attractivité des agrégats jouent alors un rôle prépondérant. Cela indique aussi qu'à partir de cette période, les agrégats sont pour la plupart pérennes et voient alors se mettre une compétition en place.

Comment se
voit l'évolution
de la
figure ?



sorte à
Agrégat en train ?

Isolé

de la stabilité ?

Figure 6.13 – Types de migration des foyers paysans.

Pour évaluer la dissémination du peuplement, on peut aussi observer la répartition des paroisses. Comme elles ont comme vocation de desservir la population des foyers paysans, elles constituent un proxy de sa répartition tout au long du temps. Les indicateurs liés figure 6.14 donnent une lecture satisfaisante là encore du processus de dissémination. En premier lieu, on note que le nombre d'églises paroissiales augmente de manière régulière au cours du temps, avec un saut entre 1060 et 1080 (comme pour de nombreux indicateurs vu auparavant (figure 6.14). Par rapport aux logiques de création et de promotion, on remarque que le nombre d'églises non paroissiales chute fortement à la même période. Ces églises se voient attribuer les droits paroissiaux, et on peut dès lors affirmer que l'accroît de paroisses de 1080 correspond surtout

à des églises rurales puisque ce sont elles qui sont susceptibles d'être promues par le mécanisme (voir chap2. ??).

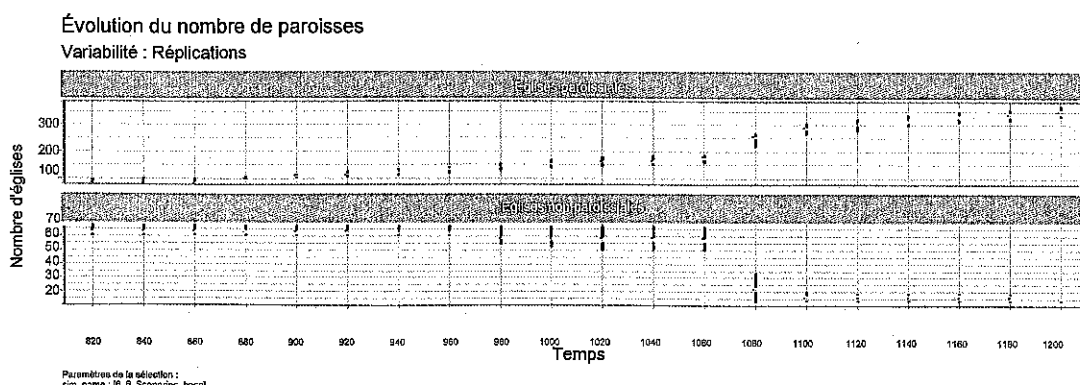


Figure 6.14 – Nombre de paroisses.

La carte de densité des paroisses (figure 6.15) n'est qu'un exemple puisqu'elle ne correspond qu'à deux réplifications et non à une agrégation de données. Toutefois, on y constate nettement la densification généralisée du maillage paroissial : contrairement à la version 0 du modèle où les paroisses périphériques demeuraient très étendues, il n'y plus véritablement ici de paroisses marginalisées (on le note aussi dans la figure 6.10-c).

Densité de paroissiens au cours du temps
Variabilité : Aucune

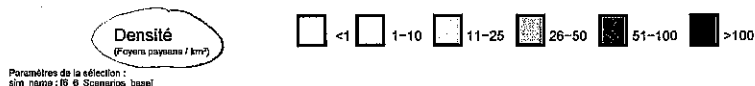
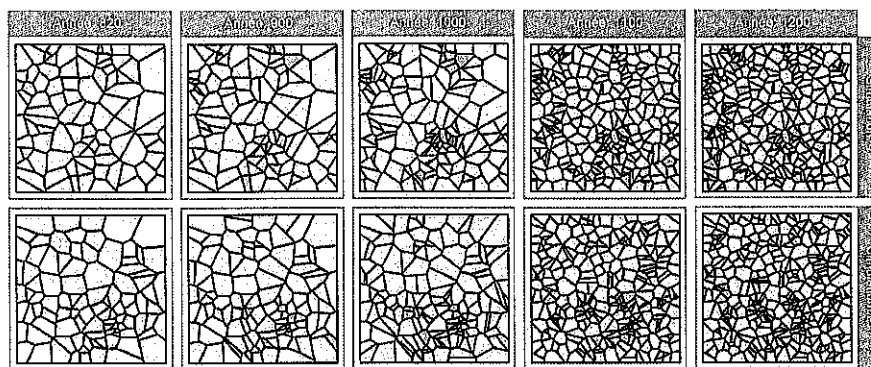


Figure 6.15 – Répartition des paroisses.

Un dernier indicateur (figure 6.16) apporte un complément généralisé. En tenant compte de la variabilité des réplifications, l'indicateur représenté parvient à montrer que l'augmentation du nombre d'églises paroissiales est bien un phénomène réparti dans l'espace. La proportion du monde simulé située à plus de 1.5 kilomètres d'une église paroissiale y diminue en effet fortement au cours du temps.

Évolution de la desserte paroissiale
Le monde est discrétisé en 400 carreaux (20*20).
On représente la proportion de carreaux qui contiennent au moins une église paroissiale

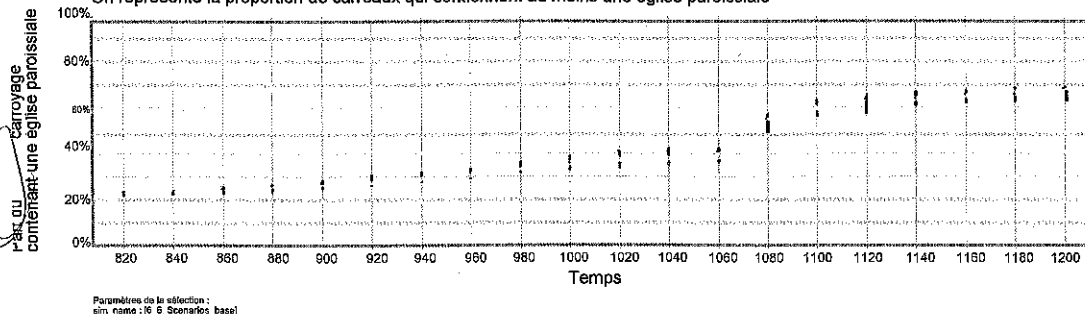


Figure 6.16 – Couverture de la desserte paroissiale.

Dans cette dimension d'analyse, SimFeodal parvient 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 de ces phénomènes. Parmi les indicateurs de sortie de simulation étudiés, ceux de cette dimension sont les plus intrinsèquement spatio-temporels, et se prêtent très mal à des indicateurs synthétiques quantitatifs. Certes, le champ de l'analyse spatiale s'est en partie

leng
rendu
24/03/2019

il y a
2 densités en jeu

? dit ce que fait
l'ind. plutôt

pourquoi ne pas
décrite directement
la figure ?
-- "augment"

Remarquer par ce qui est
conduit et non l'inverse.

1.5
km?

constitué pour répondre à ce type de problème, en trouvant des mesures synthétiques et hétérogènes 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 importante de notre méthode d'évaluation des simulations. Un espace théorique, simulé et très variable localement comme celui de SimFeodal se prête en effet extrêmement mal à une agrégation de données, puisque les différentes répliques d'un modèle ne partagent pas véritablement de référentiel spatial commun en dehors des limites du monde simulé.

Pour pousser l'évaluation et être en mesure de comparer de nouvelles simulations par le biais des indicateurs présentés ici, au moins pour ceux relatifs à la fixation et dissémination, il faudrait sans doute mener des études de cas plus approfondies. On pourrait par exemple suivre des ensembles de foyers paysans ou d'agréats tout au long des simulations pour analyser plus finement leur comportement. Mais même alors, le manque de sources empiriques se ferait forcément et fortement ressentir : on pourrait peut-être isoler la différence entre des simulations, mais serait-il vraiment possible de les départager ?

6.1.4 Après le calibrage, comment affiner le modèle ?

Le constat de la difficile amélioration des dimensions de fixation et de dissémination peut s'étendre à l'ensemble de la calibration du modèle. Quand on compare la version 0 à la version 6.6 de SimFeodal, les différences sont criantes. Les évolutions des mécanismes et paramétrages du modèle entre ces deux versions sont indiscutables, et amènent une amélioration évidente du modèle. Même au regard de versions intermédiaires, par exemple avant le calibrage du modèle (section 6.1.2), le modèle reproduit bien mieux les objectifs identifiés. *que la version 0.*

Dans un calibrage plus fin cependant, on atteint les limites de distinction possible entre des versions successives : les indicateurs de sortie deviennent plus proches les uns des autres, et la variabilité intrinsèque, due à la stochasticité du modèle, peut devenir prégnante par rapport à la variabilité des différentes configurations de paramètres. Le risque est alors d'entrer dans des erreurs d'*overfitting* (sur-ajustement) du modèle, simplement parce que les indicateurs de sortie de simulation choisis ne permettent plus véritablement de révéler l'essence des variations des résultats du modèle. Cet *overfitting* s'exprime de plus sur le terrain thématique. Les « objectifs » fixés sont ainsi porteurs d'un intervalle d'incertitude plus important que l'intervalle des variations du modèle. Départager des modèles selon qu'ils atteignent 25% ou 27% de concentration des foyers paysans n'a pas de sens quand l'intervalle jugé réaliste se situe entre 20% et 30%.

Un autre élément concourt aussi à la difficulté d'améliorer le modèle, en la matière de la complexité de ce dernier. Au niveau de précision où nous en sommes rendus, préciser le réglage d'un paramètre en vue d'un objectif précis se fait presque toujours au détriment d'un autre objectif. C'est le principe des vases communicants, où les variations de chaque paramètre doivent s'assortir

et alors ?

empiriques ou simulés ?

je ne comprends pas pour quoi tu compares autant de limites.
Ce n'est pas le pb. de méthode mais de données empiriques incomplètes. Et là en as quand même beaucoup + que nous sur les Bards !

c'est celui qui est important et celui ne ressort pas bien du parc + haut sur les limites.

OK, là je vois le lien, bien !

de variations d'autres paramètres. Cela rend la calibration plus difficile, car on manque d'une vision globale qui permettrait de comprendre l'influence réelle des paramètres sur les objectifs. Une telle vision permettrait de réorganiser les paramètres, pour chaque indicateur de sortie, en ensembles thématiques dont l'on ferait systématiquement co-varier les valeurs testées afin d'approcher de l'objectif de manière harmonisée. L'analyse des résultats de la calibration et du modèle « final » montre qu'il y a encore beaucoup de surprise et de contre-intuitif dans notre compréhension du modèle.

dir le caractère
stimulant de
ce surprise !

Pour mieux comprendre ce modèle, sous sa forme actuelle, il serait alors nécessaire de l'explorer de manière plus systématique, en essayant de comprendre l'influence réelle de chacun des paramètres plutôt que de tâtonner, de manière experte certes, en agissant sur les paramètres qui nous semblent intuitivement les plus importants. Une telle exploration, plus systématique, de grande ampleur et cherchant à dépasser l'intuition, ne peut se mener que sur une quantité réduite d'éléments du modèle (indicateurs de sortie, mais aussi intervalle de validité des paramètres), et cela requerrait dès lors de réussir à synthétiser de manière sensible les attentes que l'on a vis-à-vis des résultats du modèle.

et cela n'est
pas fait ?

à reformuler,
c'est pour l'avez
construit le modèle !

6.2 Analyser la sensibilité de SimFeodal

Parmi les nombreuses méthodes dédiées à l'évaluation de modèles, il en est une que l'on retrouve dans tous les manuels et dans la plupart des articles dédiés à la présentation de modèles. Il s'agit de l'analyse de sensibilité, catégorie en fait plurielle qui regroupent l'ensemble des méthodes vouées à tester ou à explorer la stabilité d'un modèle face aux éléments qui le composent : poids des *inputs* dans les résultats obtenus, variabilité des résultats selon les valeurs de paramètres choisies, variabilité des résultats due à l'aléa etc. Ces méthodes sont extrêmement nombreuses et constituent presque un champ scientifique entier, lié à l'évaluation de modèles, soient-ils à base d'agents ou statistiques.

Parmi celles-ci, les méthodes les plus classiques (Crooks et al. 2019, p. 257) visent à « déterminer l'influence des paramètres sur les sorties du modèle. » (Ginot et Monod 2005, p. 75). Il s'agit de faire varier les valeurs des paramètres et de mesurer les écarts résultant dans les sorties. Le plus souvent, cette mesure est quantitative, par exemple sous la forme d'un « indice de sensibilité » qui dépend des variations des sorties mais aussi de l'amplitude de la variation des paramètres ¹².

Les analyses peuvent être menées en croisant des valeurs pour tous les paramètres, c'est-à-dire en analysant la sensibilité du modèle aux interactions entre paramètres. On peut aussi procéder paramètre par paramètre, en conservant par exemple des valeurs fixes pour un jeu de paramètre (issus de calibrage) de base et en faisant varier un unique paramètre à la fois (analyse de type OFAT, « one factor at a time »).

Les analyses de sensibilités sont largement recommandées comme une pratique indispensable à la validation de modèle, mais nous avons décrit dans le chapitre 3 la démarche que nous avons préférée pour l'évaluation de SimFeodal. L'analyse de sensibilité est toutefois un outil extrêmement utile pour aider à la compréhension d'un modèle, sans chercher à en quantifier la validité. Cette méthode repose sur l'exploration d'un modèle par le prisme de ses réactions face aux paramètres choisis, et permet ainsi de mener une étude approfondie de l'influence des paramètres. Dans certains modèles, une analyse de ce type a par exemple permis de rendre plus parcimonieux un modèle KISS, en mettant en lumière le peu d'influence d'un paramètre sur l'ensemble des sorties d'un modèle. C'est le cas dans le travail de thèse de Clara Schmitt, où une analyse de sensibilité a révélé la relative inutilité de l'un des 6 paramètres mobilisés dans le modèle SimpopLocal (Schmitt 2014, p. 224-225). Dans le cadre d'un modèle exploratoire, où les très nombreux paramètres comportent vraisemblablement une part de redondance, l'ambition n'est pas de réduire la masse de paramètres, mais plutôt d'aider à comprendre lesquels ont la plus grande influence sur le modèle.

12. 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 Hamb (1994) (in O'Sullivan et Perr 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 par une variation de 0,1% du seuil de tolérance avec une variation de 20% dans la part d'espace vide.

Dans le cadre de SimFeodal, une analyse de sensibilité doit permettre, comme l'évaluation visuelle, de gagner en compréhension sur le modèle, et en conséquence sur les dynamiques modélisées.

La nature exploratoire et descriptive de SimFeodal rend l'application des méthodes classiques de l'analyse de sensibilité assez difficile : les paramètres ne sont pas tous quantitatifs, certains fonctionnent par paires, par grappes etc. De manière plus générale, une analyse de sensibilité quantitative requiert à minima des objectifs quantitatifs synthétiques, hiérarchisés et parcimonieux, ce qui n'est pas la démarche empruntée dans SimFeodal.

Dans cette partie, nous nous en tiendrons à une analyse de sensibilité gros-sière, orientée vers une évaluation visuelle, à l'instar des autres démarches d'évaluation du modèle mises en places. Nous nous inscrivons pleinement dans le raisonnement de Joanne Hirt el, d'autant plus que le dit raisonnement est tenu dans une thèse dont l'analyse de sensibilité de modèles descriptifs est l'un des enjeux principaux :

« Ces différents constats nous ont conduit à procéder à des analyses de sensibilité locales, avec la méthode OAT¹³, en modifiant les valeurs de chacun des paramètres les uns 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. »

Hirt el 2015, p. 251-252

6.2.1 Méthodologie - Analyse visuelle de sensibilité

Dans cette partie, nous décrivons et justifions brièvement la méthodologie mise en place pour l'analyse de sensibilité de SimFeodal. Les sources informatiques, précises, de la démarche sont disponibles dans le dépôt du modèle (mettre URL dossier). Le détail des paramètres, les outputs du modèle, les traitements et les sorties graphiques sont disponibles quand à eux à cette adresse : [depot these / anasensib](#)

13. [C'est un autre acronyme de « one factor at a time », identique à OFAT que nous utilisons dans cette partie.]

6.2.1.1 Calcul de la sensibilité

Nous avons choisi de mener l'analyse de sensibilité de SimFeodal en empruntant l'approche OFAT, c'est-à-dire en faisant varier les paramètres un par un. Dans un modèle complexe où les agents sont en interactions les uns avec les autres, cette approche est forcément biaisée et lacunaire au regard d'approches plus avancées comme les méthodes d'exploration de l'espace des paramètres. Pourtant, c'est la seule qui nous semblait applicable dans le cas de SimFeodal. Il convient en effet de rappeler que ce modèle est caractérisé par un nombre important de paramètres : près de 70. En ne choisissant que 5 valeurs pour chaque paramètre et pour croiser tous les paramètres, une analyse de type plan complet demanderait ~~plus~~ l'exécution de $5^{70} 20$ [replications], soit environ 10^{50} simulations...

insulte

oui !

comme par d'ail
un peu bon
choix

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 Hirt et al (2015)), on procède souvent à une sélection des paramètres afin de réduire l'ampleur de la tâche. Par exemple, quand certains paramètres ont un ancrage empirique fort, on peut considérer qu'ils se comportent plus comme des constantes que comme des paramètres, n'auront jamais à varier, et ne requièrent ainsi pas d'être analysés.

Dans SimFeodal, on aurait pu par exemple se passer d'analyser les paramètres de contexte les plus inscrits dans les connaissances empiriques. Pourtant, comme nous envisageons d'éprouver le modèle sur des scénarios hétérogènes, par exemple portant sur des régions et des périodes différentes, il nous a semblé important de tester aussi ces paramètres. On a opté pour une analyse de sensibilité de ~~chaque~~ ^{de chacun} des paramètres du modèle. SimFeodal comporte dans les faits 70 paramètres, mais en pratique, ~~le nombre de paramètres sur lesquels on peut réaliser des analyse est plus faible.~~ Ainsi, certains paramètres n'ont aucun sens quand ^{ils} mobilisés seuls. Par exemple, deux paramètres définissent le rayon minimum et maximum des zones de prélèvement. Il n'y a pas grand sens à faire varier l'un sans l'autre. Dans l'analyse de sensibilité, nous considérons ces deux paramètres comme un unique paramètre à analyser, qui ne prend pas la forme d'une valeur numérique simple, mais plutôt celle d'une étendue.

?

Pour cette analyse de sensibilité, nous avons au final analysé 57 « paramètres », certains de forme numérique simple, d'autres sous formes d'étendues, et enfin quelques-uns ayant des structures plus complexes (étendues changeant au cours du temps par exemple).

Méthode La méthode choisie est simple : on définit un jeu de paramètres de base, issu du calibrage, et pour chacun des paramètres, on exécute un ensemble de simulations en faisant varier ce paramètre autour de sa valeur de base. Comme pour toute simulation d'un modèle stochastique, il est indispensable de procéder à des réplications de ces simulations.

Comme le nombre de paramètres était déjà important, que le nombre de

réplications (20) l'était lui aussi, on a choisi de mener une analyse de sensibilité assez réduite, en ne testant, pour chaque paramètre, que 5 valeurs différentes. Ce nombre ~~est assez faible, mais~~ 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 mener ~~des~~ ^{tester} des variations de paramètres comparables, c'est-à-dire centrées autour des valeurs par défaut et présentant des variations relatives de ~~de~~ même ampleur. Par exemple, pour un modèle dont le premier paramètre vaut 10 et le second 100, on cherchera à répartir les valeurs testées de manière comparable : le premier paramètre sera testé aux valeurs 0, 5, 10, 15 et 20, et le second pour 0, 50, 100, 150 et 200.

Dans un cas réel, cette règle est difficile à suivre : on a ici pris l'exemple de paramètres quantitatifs « de stock », qui ne sont comparables qu'entre eux. Dans SimFeodal, certains paramètres ont des structures bien plus difficilement comparables, à l'instar des étendues plus haut. Comment rendre comparable cinq variations autour de 10 et cinq variations autour de l'étendue [1500m ; 5000m] ? L'étendue des possibles transformations pour ces étendues est bien plus important : diminution, augmentation, translation... V d'un stock ?
pourquoi ?

Ce problème se pose de manière plus importante encore pour les paramètres qui évoluent en fonction du temps. Par exemple, le paramètre ~~qui~~ ^{qui} agit sur la satisfaction protection des foyers paysans, a une valeur composite (de type *map*, voir ?? 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 ». Pour l'analyser dans son entièreté, il faudrait supprimer la variation en testant plusieurs valeurs, mais aussi changer le rythme de cette variation, en décaler l'étendue temporelle, en changer l'intensité etc. Sous bien des aspects, ce paramètre peut être considéré comme qualitatif, et les variations qu'on lui appliquera dans l'analyse de sensibilité ne peuvent être que très subjectives et intrinsèquement différentes.

Face à ces difficultés, nous avons adopté une position générale acceptant la subjectivité, la non comparabilité, mais cherchant à explorer des valeurs « caractéristiques » pour ce type de paramètres : activation et désactivation du mécanisme associé, valeur de base, et augmentation et diminution de l'ampleur de la valeur de paramètre. Dans l'ensemble, les valeurs de paramètres choisies (mettre les tableaux en annexe) ne sont que peu comparables de manière numérique, mais ~~cela n'empêche en rien~~ qu'elles apportent un éclairage précieux sur le comportement du modèle en fonction de ses paramètres.

Outputs Le chapitre 5 donnait des ordres de grandeur correspondant à la masse de données produites par le modèle pour une simulation, autour de 10 Mo. 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. Pour une analyse

qui n'est pas au cœur de notre démarche de co-construction, cela représentait un poids bien trop important. Nous avons choisi de réduire autant que possible la production d'indicateurs de sorties de simulations pour cette analyse de sensibilité.

pourquoi ?
ohé ?
Arguments de
légitimité ne
suffisent pas ?

Dans un premier temps, nous n'enregistrons l'état du modèle qu'à son pas de temps final (en 1200) plutôt que tout au long de son déroulement. On perd certes l'aspect dynamique et la possibilité de comparer les rythmes entre les simulations, mais comme l'analyse de sensibilité doit se concentrer sur aussi peu d'objectifs que possible, ce n'est pas véritablement gênant. Pour les mêmes raisons, on a aussi 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 à ce moment nul besoin d'enregistrer les indicateurs individuels ^{relatifs aux} des agents du modèle.

du changement

à ce stade de
l'analyse ?

La sélection des indicateurs agrégés a été assez rapide : on a choisi de reprendre les indicateurs numériques synthétiques, qui reprennent le tableau des objectifs présenté en (tableau 6.1) Parmi ceux-ci, on a conservé uniquement les 6 indicateurs « émergents » : nombre d'agréats ; nombre de grands châteaux ; nombre d'églises paroissiales ; distance moyenne entre églises paroissiales ; part de foyers paysans isolés ; augmentation de la charge fiscale.

figurant dans

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 limite. Le temps de calcul l'est tout autant, sinon plus, tant il peut s'étendre rapidement. Sur un ordinateur individuel, avec les valeurs de paramètre ^{issues du} décidées après calibrage, chaque simulation demande en moyenne 5 minutes de calcul. Multiplié par les 5700 simulations requises, l'exécution des simulations nécessaires à l'analyse de sensibilité réclame alors un temps de calcul de près de 20 jours sur un ordinateur individuel, sans véritable droit à l'erreur sous faute de recommencer ce quasi-mois de calcul.

à difficulté
c'est lié, non ?
1er point :
légitimité ?

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-Num. En distribuant les exécutions de simulation sur la quarantaine de processeurs informatiques que cela représentait au total, tout en laissant tourner les simulations uniquement de nuit pour ne pas gêner les autres utilisateurs de ces serveurs, toutes les simulations requises ont été exécutées en 3 jours, ce qui représente ~~cette fois-ci~~ un investissement temporel bien plus raisonnable.

des points ?

6.2.1.2 Analyse Quantitative - Filtrage des paramètres

Devant la masse de paramètres à analyser, nous avons réalisé qu'il était difficile de mener une analyse visuelle directe de la sensibilité des paramètres.

Il a été choisi de mener une première étape, quantitative, pour permettre de trier et de filtrer un sous-ensemble de paramètres dont une étude plus approfondie serait alors possible.

Pour cette étape, on a raisonné à l'échelle agrégée du paramètre, en cherchant à mesurer la variabilité des indicateurs de sortie choisis provoquée par la variation des valeurs de paramètres.

Normalisation des objectifs Un premier problème est que les indicateurs de sortie de simulation choisis, les objectifs, sont très hétérogènes en termes d'ordre de grandeur. Il était alors nécessaire de procéder à un « centrage » des données issues de la simulation. Ce centrage peut être effectué, classiquement, sur les valeurs obtenues, pour obtenir une moyenne valant 0, comme on le fait lors d'une normalisation classique de données.

Pour l'étude de SimFeodal, nous avons préféré centrer les données de chaque indicateur relativement aux objectifs numériques identifiés. Par exemple, une simulation produisant 250 agrégats, quand l'objectif numérique est de 200, aura pour l'indicateur « nombre d'agrégats » 50. 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 », identifiée thématiquement comme objectif (voir le tableau 6.2). 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.

Au final, ce procédé de normalisation est très proche d'une normalisation statistique classique, mais se base sur des valeurs qui ont un sens dans le modèle plutôt que sur les valeurs « abstraites » que constituent une moyenne à 0 et un écart-type de 1.

$$\text{valeur_normalisée}_{\text{indicateur}_i} = \frac{\text{valeur}_{\text{indicateur}_i} - \text{valeur_attendue}_{\text{indicateur}_i}}{(\text{valeurs_calibrées}_{\text{indicateur}_i})}$$

Ainsi conçue, la valeur normalisée permet une comparabilité au sein des indicateurs, mais aussi entre eux puisque les ordres de grandeur sont désormais similaires.

pour caractériser
en quoi c'est
un pb ?

la valeur +50

il est pas possible
de comparer

oui c'est ici que
l'on compare pour
l'hétérogénéité et
un pb -
+ haut c'est en
autre pb, celui
du référentiel

Ben c'est
clair !
Se ne vis pas de
différence ?

pas clair

de comparer
entre eux les
valeurs des
indicateurs

Calcul de la sensibilité Comme les valeurs sont désormais normalisées, il est possible de mener des opérations conjointes sur les différents indicateurs. On définit un indice global, intitulé « sensibilité », qui correspond à une moyenne, pour chaque paramètre, de ses valeurs normalisées dans chacun des indicateurs. Après le centrage, les valeurs deviennent négatives ou positives selon qu'elles sont inférieures ou supérieures aux objectifs. Pour un paramètre qui verrait des variations importantes, négatives et positives, le risque d'une moyenne est alors que la sensibilité calculée soit faible, le très positif compensant le très négatif. Pour prévenir ce risque, on a choisi de calculer la sensibilité sur les valeurs absolues des valeurs normalisées plutôt que sur leur valeur brute. La sensibilité de chaque paramètre peut alors être définie comme suit :

$$\text{sensibilité}_{\text{paramètre}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{valeurs_normalisées}_{\text{paramètre}_j}$$

$\frac{n}{\text{indicateurs}} \quad \frac{n}{\text{valeurs_paramètres}} \quad \frac{n}{\text{réplications}}$

Sélection de paramètres En calculant la sensibilité de chaque paramètre, on sera en mesure d'en sélectionner un sous-ensemble afin de procéder à une analyse visuelle de la sensibilité de ces derniers. Pour isoler ce sous-ensemble, on ne conservera que les paramètres à la plus forte sensibilité globale, en cherchant à en conserver une dizaine. Ce nombre est volontairement imprécis puisqu'il dépendra surtout 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 entièrement subjective d'examen visuel des écarts entre les valeurs de sensibilité, tel qu'on peut le faire pour choisir un nombre de classes à étudier lors de l'exécution d'une classification ascendante hiérarchique.

Un risque de cette méthode est que certains indicateurs peuvent contribuer bien davantage que d'autres à la sensibilité d'ensemble, malgré la normalisation. Pour ne pas risquer de négliger des paramètres dont la sensibilité s'exprimerait uniquement sur certains indicateurs, on complètera la sélection de paramètres précédente par une sélection des trois paramètres les plus sensibles sur chacun des 6 indicateurs.

$$\text{sensibilité}_{\text{paramètre_indicateur}_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{valeurs_normalisées}_{\text{paramètre_indicateur}_i}$$

$\frac{n}{\text{valeurs_paramètres}} \quad \frac{n}{\text{réplications}}$

En considérant qu'une large partie de ces paramètres auront vraisemblablement déjà été isolés par le filtre sur la sensibilité globale, on devrait obtenir quelques paramètres supplémentaires sur lesquels mener l'analyse visuelle.

6.2.1.3 Analyse visuelle

Une fois les paramètres à étudier sélectionnés, on pourra alors 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 pos-

à "des paramètres" ?
ou "aux variables de param" ?

dénominateur ?

Forme

exact retenu

très bonne idée !

?
contradiction
mais bonne idée

mais cette méthode devrait permettre de sélectionner

et ainsi éviter de laisser de côté un paramètre ayant un effet important quoiqu'il soit 1 nb. réduit d'objectif retenu

sible d'analyser l'importance de cette influence (la sensibilité), mais aussi sa cardinalité : en observant la réaction des indicateurs de sortie en fonction des valeurs de paramètre, on pourra noter les corrélations (visuelles).

Cette analyse visuelle de sensibilité s'inscrit ainsi dans une analyse à la fois technique et thématique de SimFeodal. Elle doit en effet permettre de gagner en compréhension sur les interactions entre paramètres et mécanismes. Cela devrait éclairer l'aspect technique, lié à la validation interne du modèle – tel paramètre que l'on pense jouer sur tel mécanisme se comporte-t-il bien comme attendu ? – et l'aspect thématique – est-ce que la taille du monde simulé a

Visualisation L'objectif de la visualisation de la variation des paramètres est d'observer, pour chaque paramètre, comment ce dernier varie sur chacun des indicateurs. Pour cela, on représente la variation due aux réplifications de chaque paramètre au moyen de représentations visuelles dédiées à la variabilité, comme des *box-plots* ou *violin-plots*. La figure 6.17 présente un exemple de mise en page de telles représentations graphiques afin de faciliter l'analyse de sensibilité visuelle.

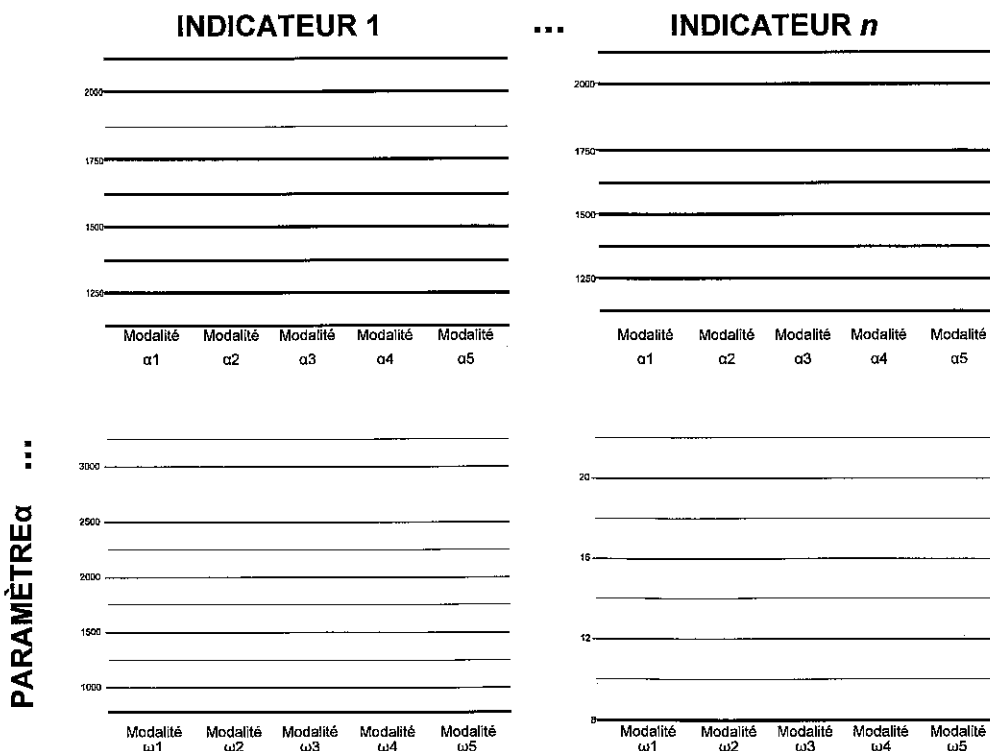


Figure 6.17 – Construction et mise en page de planches graphiques dédiées à l'analyse visuelle de la sensibilité des 5 modalités de 1 paramètre sur n indicateurs.

Normalisation La normalisation des valeurs afin d'homogénéiser indicateurs et variation des paramètres était indispensable afin de garantir une comparabilité acceptable lors de l'analyse de l'ensemble des paramètres. Pourtant, sur un sous-ensemble de paramètres qui doivent être étudiés plus précisément, cette normalisation est un frein à l'interprétation : les valeurs des différents indicateurs ne sont plus exprimés dans l'unité d'origine et il est alors difficile d'en faire un commentaire thématique. L'analyse visuelle sera ainsi présentée sur les valeurs brutes issues des simulations, et chaque graphique aura en conséquence un axe des ordonnées propre.

6.2.2 Sélection des paramètres

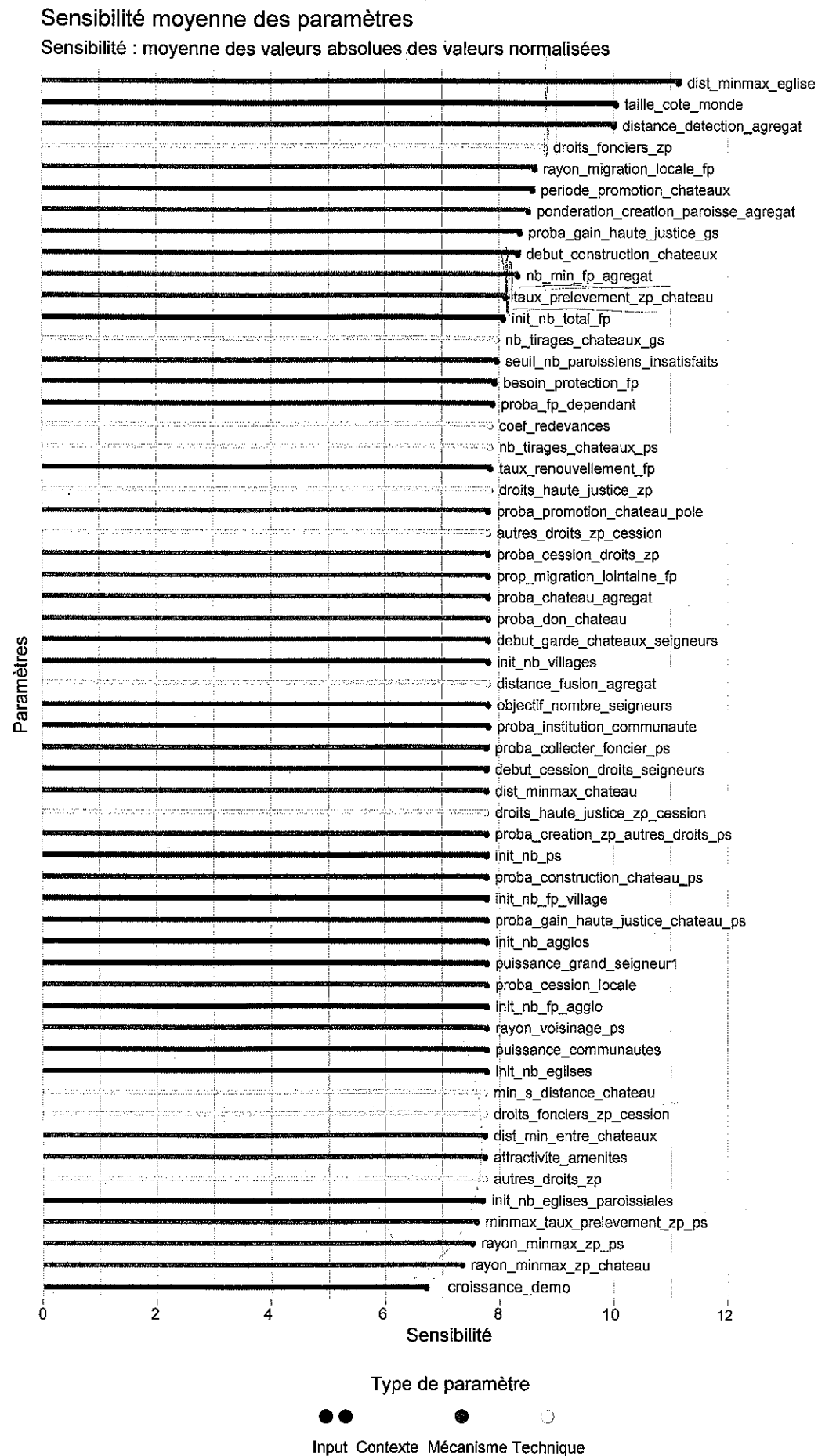


Figure 6.18 – Analyse de la sensibilité d'ensemble de tous les paramètres de

La figure 6.18 présente les « scores de sensibilité » de chacun des paramètres du modèle.

Une première remarque est que de manière légèrement contre-intuitive, on ne peut discerner de motif particulier selon les types de paramètres : les *in-puts*, paramètres de contexte, de mécanisme et enfin les paramètres techniques sont dispersés et entremêlés dans le graphique. On se serait vraisemblablement attendu à ce que les inputs et paramètres de contexte jouent un rôle plus important que les paramètres techniques par exemple.

Pondérons toutefois cette remarque en rappelant que malgré une homogénéisation des valeurs en sortie par leur normalisation, il n'y a ici aucune compensation de l'étendue très variable des valeurs de paramètre testées (disponibles dans l'annexe N). Par exemple, si l'on compare un paramètre très sensible (la taille du monde simulé, *taille_cote_monde*) et un paramètre peu sensible (le taux de croissance démographique introduit dans le modèle, *croissance_demo*), on peut réaliser que l'ordre de grandeur de la variation est faible.

- Pour *taille_cote_monde*, dont la valeur de base est de 80 km, les valeurs testées sont 50, 75, 100, 125 et 150 km. Il y a donc à peu près une variation qui va de la moitié de la valeur de base à son double.
- Pour *croissance_demo*, les seuils sont plus restreints. Pour ne pas déstabiliser les autres indicateurs, ce paramètre a été modifié en tenant compte d'une population finale stable de 40 000 foyers paysans, en adaptant à chaque valeur de croissance démographique une valeur différente de population initiale. De ce fait, la valeur de base de croissance démographique est de 0%, et les valeurs testées sont de 1.53%, 3.72%, 5.89% et 12.89%. Ces valeurs permettent de faire passer la population de la stabilité au décuplement. Au regard du paramètre précédent, l'étendue interprétée est large, mais en absolu, les 4 premières valeurs sont 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 ces étendues incomparables permet d'éclairer la première remarque quant au fait que les paramètres techniques ne sont pas relégués en bas de ce graphique. Par définition, les paramètres techniques ont des valeurs qui ne représentent strictement rien d'un point de vue thématique. Leur étendue acceptable est alors extrêmement difficile à évaluer, et on aura ainsi pu avoir tendance à effectuer de mauvais jugements sur les valeurs testées de ces paramètres, les conduisant soit à être sur-valorés (le paramètre de caractérisation des droits fonciers, *droits_fonciers_zp* semble entrer dans cette catégorie avant examen spécifique), soit à sembler sous-valorés (le paramètre *distance_fusion_agregat* par exemple, a été modifié à de nombreuses reprises lors du paramétrage du modèle et était à ce moment assez important).

Notons aussi que dans les 10 paramètres jugés les plus sensibles, 4 portent sur des valeurs testées « qualitatives » (étendues, variables au cours du temps..., voir p. 27), alors que ces paramètres ne représentent que 20% de l'ensemble des paramètres testés. Là encore, on peut estimer que cette légère sur-représentation de ces paramètres tient à la difficulté de leur attribuer des étendues compa-

pourquoi ?
→ expliquer ou
enlever

ah oui ?

ne
saurait-il pas
d'abord comment
un peu cette
figure ? Distinguer
le sens avant
3 ?
→ Commenter
les 3 sens

pas compris

comment peut
critère pour
c'est technique ?

Cette part
est difficile
à saisir.

rables.

pour les autres on sait pas ?
Et comment on sait ?

Un dernier constat, à l'échelle très agrégée qui caractérise ces analyses, nous paraît extrêmement rassurant en termes de validation interne du modèle : aucun des paramètres testés ne présente une sensibilité véritablement faible, qui plus est en considérant que la plus faible sensibilité mesurée (paramètre croissance_demo) correspond à un paramètre dont l'on sait qu'il a une influence réelle sur les sorties du modèle. Ce simple constat nous indique que dans la limite du jeu de paramètre issu du calibrage, aucun paramètre n'est inutile, et ne devrait par conséquent être supprimé du modèle si on recherchait une parcimonie plus importante à cette étape.

il y en a trop !
et c'est pas clair.
Tu veux dire :
De plus, en outre ?
ou d'autant plus ?
Fait une 2^e
phr.
je ne comprends pas
le 2^e bout
d'ailleurs.

À la lecture du graphique, on remarque qu'autour des 10 premiers paramètres, on peut constater qu'un « saut » dans les valeurs de sensibilité se produit entre les paramètres nb_min_fp_agregat et taux_prelevement_zp_chateau. L'écart entre ce dernier paramètre et le suivant est en effet assez faible, et on décide de ne conserver que les 10 premières paramètres (le 10ème est nb_min_fp_agregat) pour l'analyse visuelle.

La sélection des trois paramètres ayant la plus forte sensibilité sur chaque indicateur complète cette liste avec 4 nouveaux paramètres, portant le total à 14 paramètres dont la sensibilité sera analysée visuellement. Le tableau 6.4 en présente la liste ainsi qu'une description complète.

trop parachuté

ps de
commentaire sur
le 1^{er} saut ?

ainsi que le figon
Le fond est parfait mais à
mieux valoriser...

Description	Intitulé	Type de paramètre
Étendue (variable au cours du temps) dans laquelle un foyer paysan calcule sa satisfaction religieuse	dist_minimax_eglise	Mécanisme
Dimensions de l'espace du modèle en km de côté. (Une marge de 1km de large est oitée dans les simulations afin d'éviter les effets de bord).	taille_cote_monde	Input
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	Mécanisme
Prélèvement de droits fonciers : montant des redevances perçues par le seigneur détenteur de la zone de prélèvement pour chaque foyer paysan assujéti	droits_fonciers_zp	Technique
Rayon de distance dans lequel un foyer paysan effectue une migration locale	rayon_migration_locale_fp	Mécanisme
Période au cours de laquelle les châteaux peuvent devenir des gros châteaux	periode_promotion_chateaux	Contexte
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	Mécanisme
Probabilité pour un grand seigneur d'acquérir des droits de haute justice à chaque pas de simulation.	proba_gain_haute_justice_gs	Contexte
Date à partir de laquelle des châteaux peuvent être construits par les seigneurs	debut_construction_chateaux	Contexte
Nombre minimum de foyers paysans nécessaires pour constituer un agrégat	nb_min_fp_agregat	Mécanisme
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	Mécanisme
Nombre de tirages successifs de la probabilité qu'un des petits seigneurs crée un château.	nb_tirages_chateaux_ps	Technique
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
Taux de croissance du nombre de foyers paysans à chaque pas de simulation	croissance_demo	Contexte

pas sur le fichier non plus.

6.2.3 Évaluation visuelle de la sensibilité

Les graphiques présentés dans la suite de ce chapitre ne concernent que les paramètres sélectionnés lors de l'analyse quantitative globale. Tous les paramètres peuvent toutefois être analysés individuellement, de manière interactive, dans la partie dédiée de la plate-forme SimEDB : [Mettre un lien direct.](#)

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 de ces paramètres. d'en lire une

6.2.3.1 Monde Paramètres liés au monde simulé

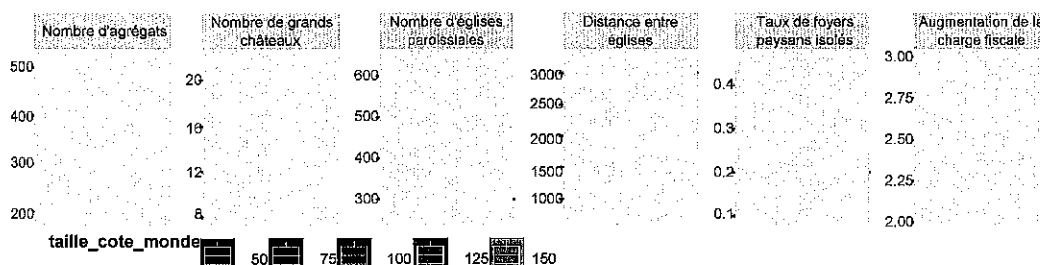


Figure 6.19 – Sensibilité à la taille du monde simulé.

Le paramètre régissant la taille du monde simulé est le seul des inputs présent dans la sélection. De manière peu surprenante, c'est un paramètre majeur qui affecte la totalité des indicateurs étudiés, selon une polarité assez intuitive (figure 6.19). 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'agréats 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'agréats, de superficie vraisemblablement supérieures par les effets des mécanismes de fusion des agrégats. Quand la superficie d'ensemble est plus faible, toutes choses égales par ailleurs concernant le nombre et le rayon des zones de prélèvement, on assiste nécessairement à une superposition plus importante de ces zones. La charge fiscale des foyers paysans s'en retrouve fortement affectée.

Un effet de ce paramètre nous paraît légèrement contre-intuitif : avec une surface plus importante, il est entièrement logique que la distance entre les églises augmente, puisque celles-ci sont forcément plus dispersées dans un monde plus large. Pourtant, le nombre d'églises paroissiales croît aussi avec la superficie du monde simulé, ce qui ne nous semble pas directement interprétable. On peut émettre l'hypothèse que cette augmentation est une conséquence de la dispersion des foyers paysans au sein de petits agrégats. De petites églises paroissiales seraient 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.

manger la
coulure ?

à dire ici ?
aller à l'envers ?
plus

on voit cela sur
la figure ?

combien pour le
monde restreint ?

En effet,

tu veux dire que
cela ne correspond pas
aux règles
inductives ?

résultat du
mécanisme
implémenté dans
un effet non linéaire ?
the combi. d'impression ?

6.2.3.2 Foyers paysans et agrégats

Je préciserai "Paramètre" à chaque fois

Les foyers paysans (et les agrégats de population qui résultent de leur concentration) sont les agents les plus déterminants dans les évolutions 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.

Les trois paramètres, spécifiquement liés aux foyers paysans, qui montrent la plus forte sensibilité (figure 6.20) embrassent trois aspects bien différents des mécanismes des foyers paysans.

"gérant le comportement"

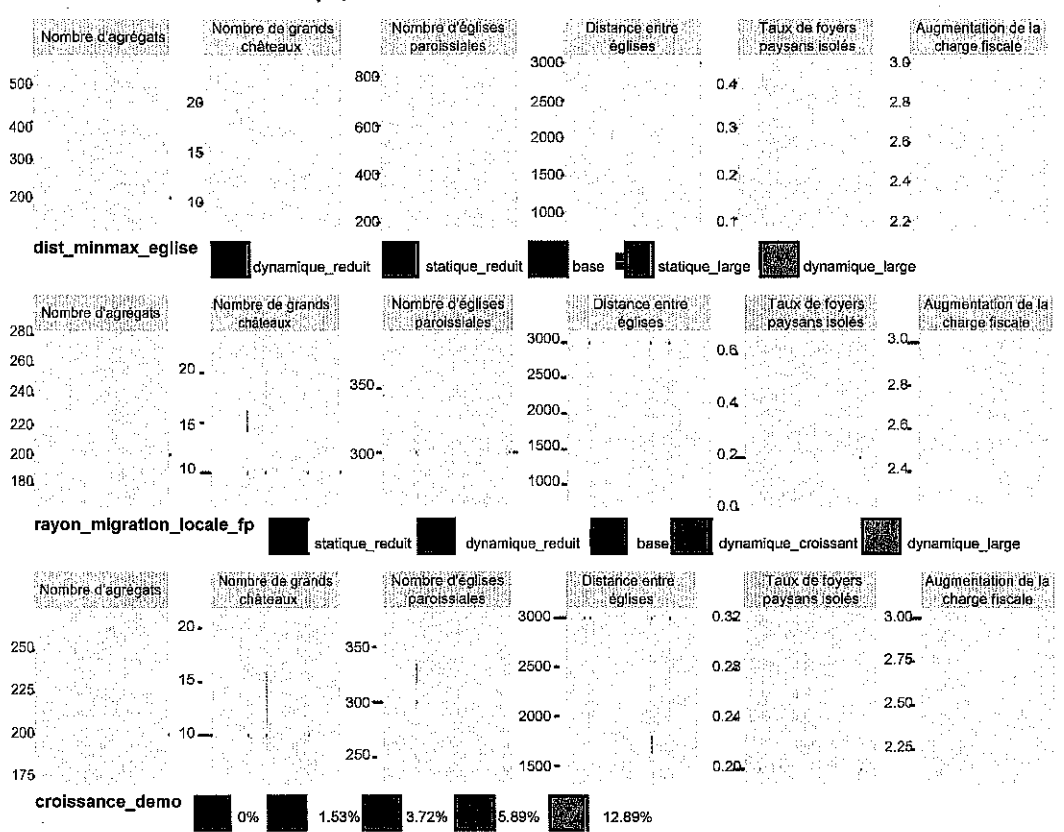


Figure 6.20 – Sensibilité des paramètres liés aux foyers paysans.

Le premier de ces paramètres (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 des objectifs. En matière d'interprétation, le fait que cette satisfaction soit déterminante est inattendu : on a pu constater dans les résultats du modèle (??) que le facteur limitant de la satisfaction d'ensemble était la satisfaction protection. Les valeurs testées, qualitatives, 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 évidente. Plus les étendues testées sont restreintes, plus le nombre d'agrégats et de foyers paysans isolés est important : cette satisfaction joue sans doute à ce moment là le rôle limitant et « force » les foyers paysans à migrer à proximité d'églises paroissiales.

Cette migration, au moins pour l'aspect local, est largement influencée

met le point sur ()
on voit cela sur la figure donc ?
pas compris.
Info sur figure ?
où je vois le paramètre ?
dehors de la pb... Et faut trouver un moyen... on en parle

par le second paramètre de la sélection : le rayon maximal de migration locale des foyers paysans. Celui-ci n'est pas une étendue, mais un seuil maximum qui peut (valeurs « dynamiques ») changer au cours du temps, la logique étant que plus le temps passe, plus ce rayon est susceptible d'augmenter en lien avec des aspects cognitifs et liés à l'intégration du système de peuplement qui voit ses distances-temps rétrécir. 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 63% à seulement 3%. Les effets sur le nombre d'agréats, de grands châteaux et d'églises paroissiales ne sont pas directement linéaires et l'on peut penser que les variations de ce paramètre montre alors des tendances diverses selon l'ordre de grandeur des seuils empruntés.

La croissance démographique est particulière dans le modèle. On la considère comme un paramètre de contexte, mais elle aurait également entièrement sa place parmi les inputs tant son importance thématique est majeure. À la lecture des graphiques, on peut s'étonner de ce que ce paramètre soit le moins sensible (figure 6.18) tant son effet est direct sur tous indicateurs présentés (à l'exception du nombre de grands châteaux). On remarque qu'un taux de croissance plus élevé réduit le nombre d'agréats tout en réduisant aussi le taux de foyers paysans isolés, deux effets qui sont souvent inversés dans les différents paramètres. C'est extrêmement intéressant pour le modèle tant ce paramètre permet d'approcher des objectifs de ces indicateurs qui sont tous deux dépassés alors qu'opposés. Ce paramètre fait l'objet d'un scénario thématique (section 6.3.1), et on le décrira plus avant à ce moment-là.

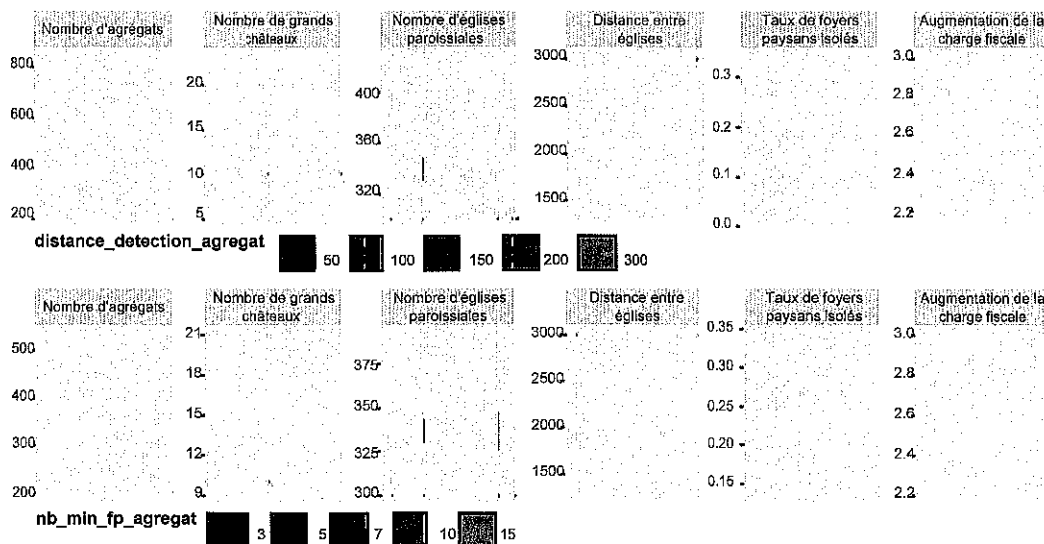


Figure 6.21 – Sensibilité des paramètres liés aux agrégats.

Les deux paramètres agissant sur la définition des agrégats (figure 6.21) sont très comparables et agissent de manière symétriquement opposée sur les indicateurs de sortie. Sans surprise, leur effet est largement circonscrit aux indicateurs relatifs aux foyers paysans (à l'exception surprenant des églises paroissiales, peut-être pour les mêmes raisons que le paramètre de taille du monde simulé), mais il est intéressant de noter leur extrême sensibilité, plus que linéaire, à des variations relativement fines dans les ordres de grandeur mobilisés (quelques foyers paysans de plus à l'échelle des 40 000, 50 ou 100

sur le foyers
6.18 ?
je ne vis pas

le paramètre van
effectivement dans
le temps ?

= un 2^e ou 3^e
paramètre ?
Le lecteur peut
le voir

Où est expliqué
la diff.
input / contexte ?
y référer

pourquoi en
parle-t-on alors ?

pas clair
du tout
Rien placé du tout ?

cad ?

je vais
regarder si je n'ai
rien écrit sur la
fiche...

mètres à l'échelle d'un monde de 80 kilomètres de côté...). Les variations présentées dans la figure indiquent que les valeurs par défaut (100 m et 5 foyers paysans) sont au moins dans des intervalles assez sensées au regard des objectifs poursuivis.

6.2.3.3 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 les mécanismes associés qui façonnent le monde dans lequel les foyers paysans auront à évoluer et dans lequel ils essaieront de ne pas être trop insatisfaits.

A partir d'ici je regarde la
pdf.
Très jolies et
fin, on y

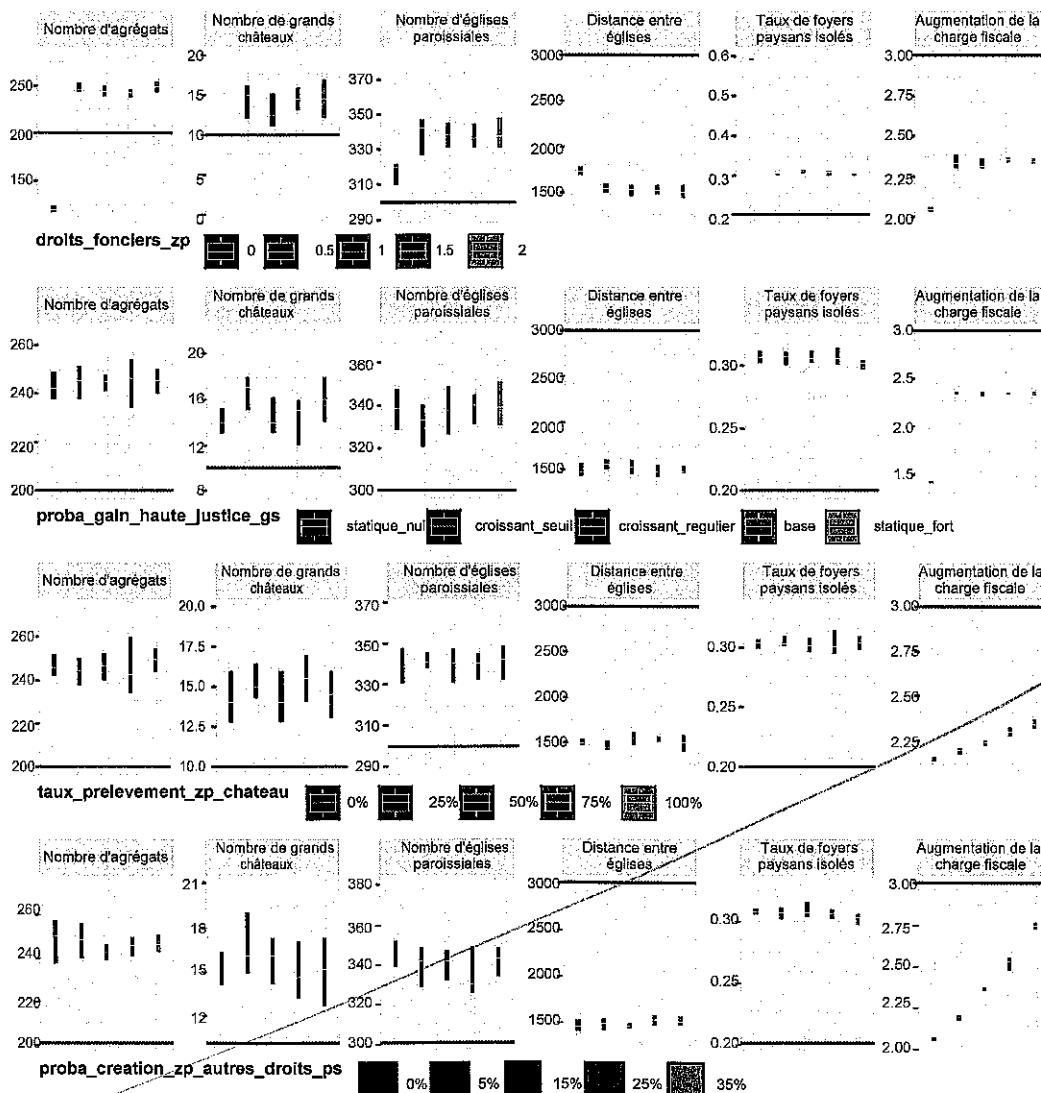


Figure 6.22 – Sensibilité des paramètres liés aux seigneurs.

Une caractéristique commune aux quatre paramètres isolés (figure 6.22) tient au test de valeurs nulles, ou autrement dit, à la désactivation des mécanismes associés. Dans les deux premiers paramètres, l'effet de rupture est net, par exemple sur l'augmentation de la charge fiscale. Le montant des droits fonciers collectés ne joue que par son activation ou non (les valeurs supérieures à 0 présentent des résultats très similaires), mais présente un effet clair sur le nombre d'agrégats et l'agrégation des foyers paysans. L'existence et la proportion des droits de haute justice des grands seigneurs ne semble jouer que 39

A chaque fois tu attaquas bien en tête. Commence par un commentaire un peu simple, que le lecteur s'approprie l'info contenue dans la figure.

identifiés ?
(à partir de le fig 6.18 ou 6.19 donc ?)
Je les énumère à chaque fois même s'ils figurent sur la fig.
pas possible

c'est ça ?

c'est ça ?

sur la charge fiscale, mais y exerce une influence énorme : c'est le seul paramètre dont une valeur testée peut faire diminuer autant (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 suivant, où la valeur de 0% correspond aussi à une désactivation du mécanisme ~~le~~, cela n'a aucun effet de seuil notable : ces paramètres se comportent, dans l'étendue testée, comme des éléments linéaires sur l'augmentation de la charge fiscale. Ils semblent assez dépourvus d'influence sur les autres indicateurs, mais en particulier pour le dernier paramètre, leur action sur la charge fiscale est notable. Pour améliorer le calibrage du modèle sur cet indicateur, on aurait sans doute intérêt à augmenter la valeur par défaut du paramètre `proba_creation_zp_autres_droits_ps`, y compris au delà des valeurs ici testées. Ce serait d'autant plus adapté que la sensibilité globale de ce paramètre est relativement faible (36ème sur les 57 paramètres).

concern
? pas clair

répét

power?

tu ne commente
jamais les #
élèves de tes
"patate" -
ou si t'as loupé
+ haut ?

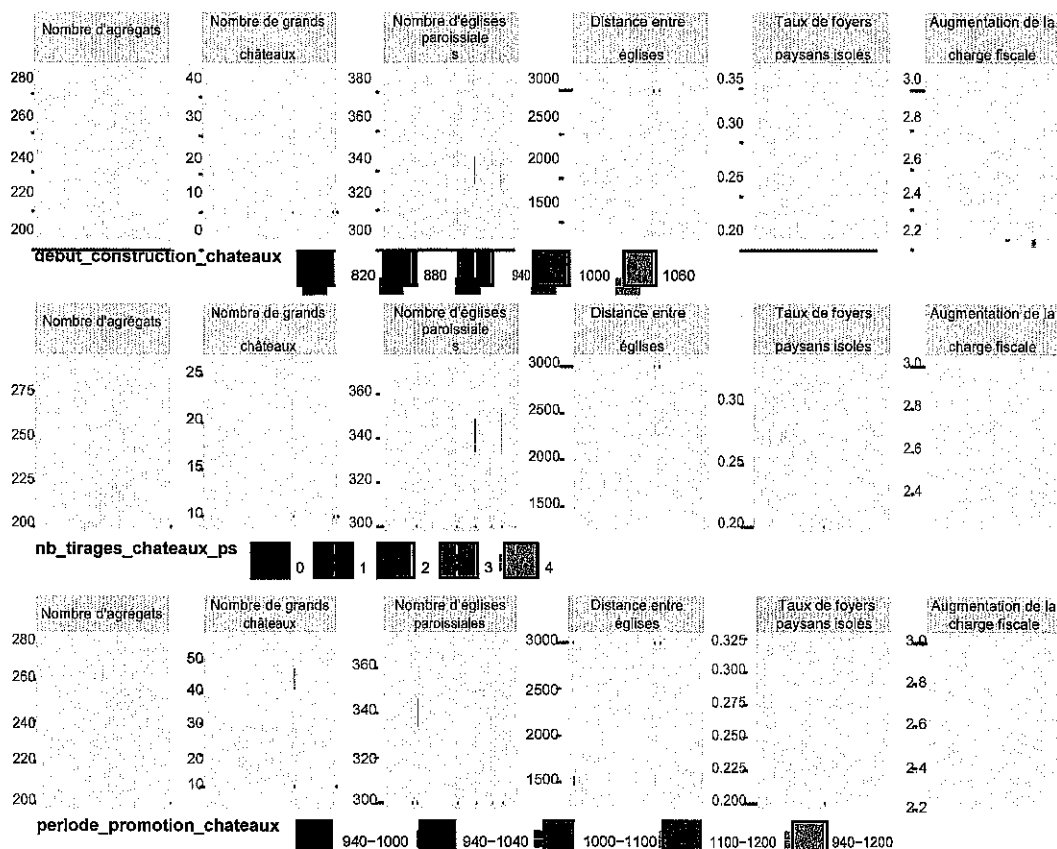


Figure 6.23 – Sensibilité des paramètres liés aux châteaux.

Les paramètres liés aux châteaux sont sensiblement sur-représentés parmi ceux qui ont la sensibilité la plus forte : il n'y en a que 6 sur les 57 paramètres (environ 11%), mais ils représentent 20% des paramètres les plus sensibles et 21% dans cette sélection de paramètres remarquables.

les ennuis

C'est assez remarquable, d'autant qu'on peut constater à la lecture des deux premiers paramètres de la (figure 6.23) que leur rôle ne se cantonne absolument pas à un simple raffinement du contexte où l'atteinte d'un certain nombre de grands châteaux serait à la fois un objectif et un élément déterministe. Sur ces deux premiers paramètres, on remarque certes une très forte variation de l'indicateur directement lié, le nombre de grands châteaux, mais aussi et surtout un lien net avec la concentration des foyers paysans (et un autre

terminologi
intellektual
Fig. 6.19

describ la figura
"ave una ag. de la
paga. ish qd le debent
confundit + tardar"

now - 1948

En 1
cette

lien moins significatif avec l'augmentation de la charge fiscale). La conception et le paramétrage des mécanismes liés aux châteaux ont demandé un travail conséquent (voir la partie dédiée leur calibrage – section 6.1.2 – p. 9), vraisemblablement trop important relativement à la complexité de leurs règles et à notre propre estimation subjective de leur apport concret au modèle. Pourtant, les résultats de cette analyse de sensibilité donnent tort à l'expertise du modélisateur 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.

Le troisième paramètre, la période durant laquelle les châteaux peuvent être promus en grands châteaux, apporte un léger contrepoint, ou au moins une précision à ce constat. Ce paramètre est déterminant dans le nombre de grands châteaux présents en fin de simulation, mais ~~peut-être~~ il n'a aucune influence significative sur les autres indicateurs. Peut-on dès lors penser que la hiérarchie mise en place entre les châteaux, et la différence d'attractivité qui en découle, n'est pas indispensable au modèle ? Il faudra pour cela mener une étude plus approfondie des relations entre proportion de grands châteaux et les autres indicateurs. Rappelons en effet que l'analyse de sensibilité ici menée est grossière, et n'étudie aucunement les interactions entre valeurs de paramètres dont on peut imaginer, au sein d'un modèle aussi descriptif et complexe, qu'ils ont des effets locaux conséquents.

6.2.3.4 Églises et paroisses

Le dernier paramètre de cette analyse visuelle est aussi le seul qui porte sur un élément aussi conséquent que les paroisses, lesquelles sont 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).

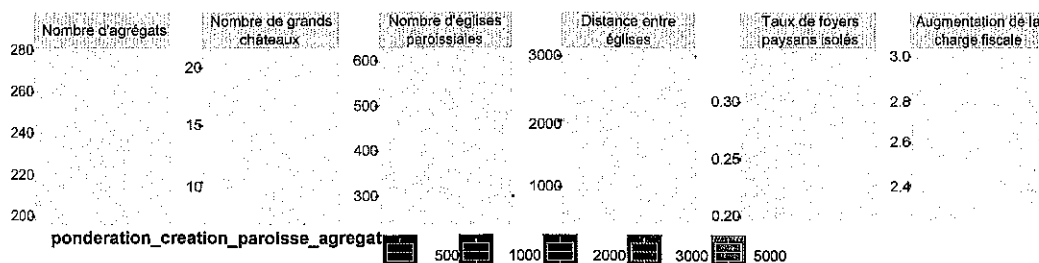


Figure 6.24 – Sensibilité du paramètre de pondération de création de nouvelles paroisses dans les agrégats.

La figure 6.24 présente les réponses des indicateurs à différentes valeurs du paramètre `ponderation_creation_paroisse_agregat`. 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. Passé cette trivialité, on notera avec intérêt la variation amenée par ce paramètre sur le nombre d'agréats : plus le seuil est élevé, plus les agréats sont nombreux, et cette corrélation apparaît visuellement significative et inverse à celle du nombre d'églises paroissiales, contrairement aux tendances que l'on a pu observer dans les paramètres liés aux foyers paysans et agréats (section 6.2.3.2). *peut être ? 6.2a, 6.2b*

Pour ces paramètres, ^{avec ces paramètres} nombre d'agréats et d'églises paroissiales varient dans le même sens face aux valeurs de paramètres. Dans le cas du paramètre de pondération de la création de paroisses « urbaines », la relation est inverse, et il est difficile de l'expliquer, de même que le lien (plus ténu, mais lui aussi inverse) avec la concentration des foyers paysans. On peut émettre l'hypothèse que cette pondération influe largement sur la hiérarchie des paroisses et des pôles. En créant moins de paroisses en zone dense, la distribution de l'attractivité des pôles d'attraction – qui est mesurée en large partie sur le nombre d'églises paroissiales qui les composent – tend peut-être vers plus d'uniformité, et favorise ainsi ^{relatif} relativement l'attraction locale vers des pôles de plus faible attractivité, et *favorise la migration* donc vers des agréats plus locaux et faiblement peuplés.

6.2.4 Analyser la sensibilité à l'aléa

En menant l'analyse de sensibilité visuelle, on a pu remarquer que certains indicateurs présentaient une plus forte variation que d'autres. Une partie de l'explication ^{tient} tenait certainement à l'inégale amplitude des valeurs de paramètres testées, lesquelles influencent potentiellement plus directement ces indicateurs, mais cela ne nous semble pas être une explication suffisante. *d'autres facteurs peuvent être en jeu*

De manière globale, on constate dans les résultats de la version calibrée de SimFeodal (tableau 6.2) que la variabilité des indicateurs émergents, *est mesurée à partir de leur s, est forte* assez forte en termes d'écart-type. L'écart-type se lisant dans l'unité de l'indicateur mesuré, il peut être intéressant de le transformer en coefficient de variation ($CV_{\text{indicateur}} = \text{indicateur} / \text{indicateur}$) pour obtenir des valeurs comparables entre les indicateurs.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation
Agréats	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 6.5 – Mesures de dispersion des indicateurs de sortie de la version calibrée (6.6) de SimFeodal.

La lecture du tableau 6.5 nous montre que, rapportée à un paramètre de la comp. de coeff. de var. (tabl 6.5)

dispersion relative comme le coefficient de variation, la variabilité des indicateurs due à l'aléa est assez faible, et dans des ordres de grandeurs assez comparables entre les indicateurs (à l'exception du nombre de grands châteaux).

Pourtant, lors de l'analyse de sensibilité, on a pu constater des variations (étendue dans l'axe des ordonnées des *violin-plots*) bien plus importantes au sein des réplifications des paramètres testés.

Il nous paraît par conséquent utile de mener un bref complément d'analyse, dédié à l'étude de la variabilité au sein des réplifications d'une expérience. De telles analyses nous paraissent peu fréquentes dans la littérature liée aux modèles de simulation en géographie, mais on en trouve tout de même une définition chez Ginot et Monod (2005), qui nomment ces approches des « 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. »

Ginot et Monod 2005, p. 76

Pour mesurer cette incertitude, nous avons repris l'ensemble des réplifications correspondant à l'analyse de sensibilité de chaque paramètre, et nous avons mesuré la variabilité (écart-type) sur chaque indicateur. Afin d'avoir des mesures comparables, on a ensuite procédé à une réduction (division par l'écart-type des valeurs de référence, présentées dans le tableau 6.5) de l'amplitude de ces valeurs.

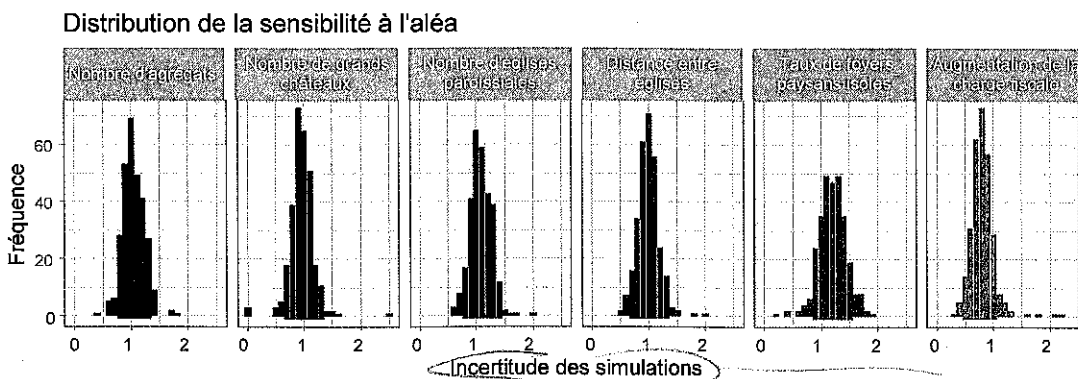


Figure 6.25 – Sensibilité à l'aléa selon les indicateurs.

La distribution de ces valeurs d'incertitude réduites est présentée dans la figure 6.25. Dans ces histogrammes, la valeur de 1 correspond à une incertitude moyenne identique à celle des réplifications de référence. 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 attendue. Autrement dit, cer-

taines valeurs de certains paramètres amènent une bien plus forte variabilité : ils laissent une part plus importante à la stochasticité du modèle.

On peut remarquer que la plupart des indicateurs présentent des *outliers*, c'est-à-dire des valeurs de paramètres pour lesquelles la variabilité due à l'aléa est nettement supérieure (ou inférieure) à la normale. Dans le cas du nombre de grands châteaux, il y a même des valeurs de paramètres qui montre une absence presque totale de variabilité à l'aléa. Sans aller plus loin sur cet exemple, on peut penser qu'il s'agit 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 présentons une représentation graphique dans la figure 6.26.

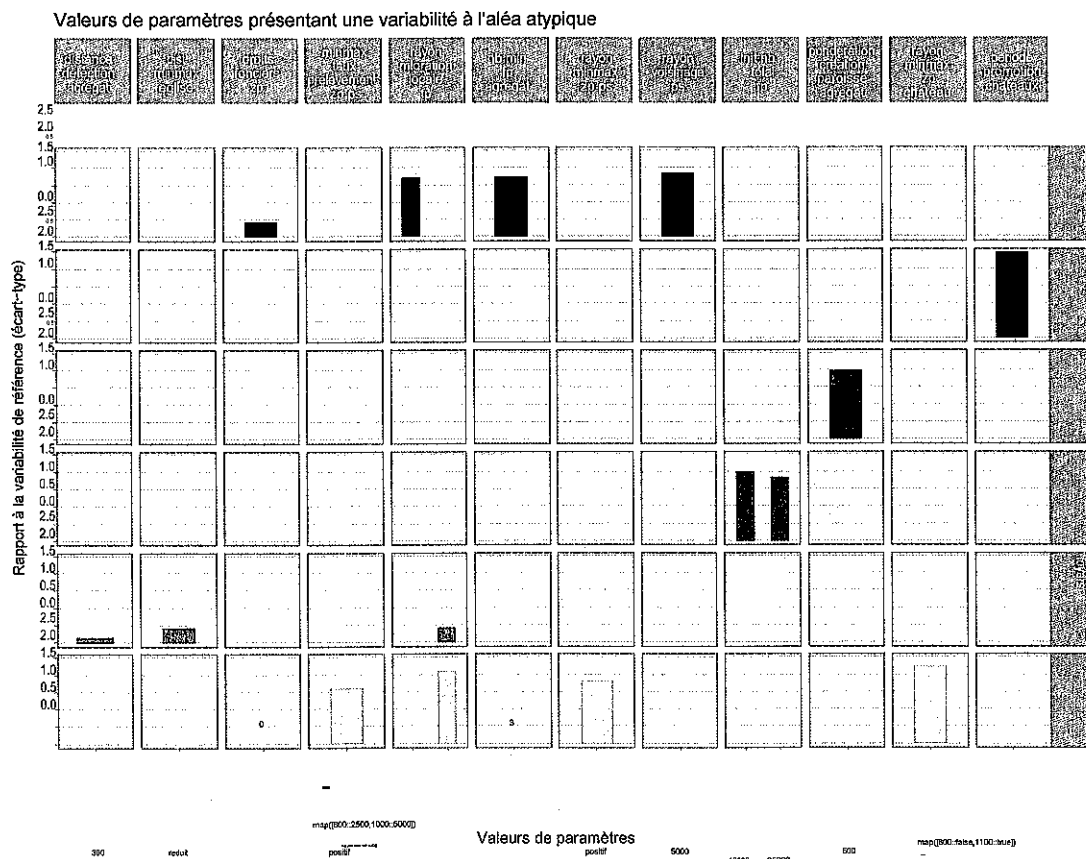


Figure 6.26 – Paramètres présentant des sensibilités atypiques à l'aléa.

De manière globale, on peut remarquer que les indicateurs relatifs aux foyers paysans présentent plus de valeurs extrêmes que les autres, c'est-à-dire sur une plus forte diversité de paramètres. Notons aussi que sur les 14 valeurs de paramètres isolées, la moitié concernent des paramètres qualitatifs. La difficile estimation de l'amplitude 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 passe dans des régimes locaux différents du régime de base caractérisé par les réponses aux paramètres calibrés.

Plus spécifiquement, on peut constater le comportement très particulier du paramètre régissant le rayon maximum de migration locale des foyers paysans. Non seulement les valeurs de ce paramètre sont parmi les plus fortes sensibi-

juste

fact à vérifier non?

les représentations graphiques
ou en proposant une repré-

?

tu es en régime "régime de base" + haute

certains valeurs correspond à ?

lités à l'aléa (indicateurs nombre d'agréats et augmentation de la charge fiscale), mais de manière surprenante, la valeur correspondant à un rayon évolutif très étendue par rapport à la valeur de base ($\text{map}([800:5000, 1000:10000])$) 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 varier tout aussi fortement la part de l'aléa dans le modèle. Nous pensions exécuter un scénario thématique qui fasse varier ce paramètre afin d'étudier l'effet sur la hiérarchie des agréats, et cette analyse confirme que ce serait tout à faire approprié.

6.2.5 Conclusion et apports de l'analyse visuelle de sensibilité

On peut tirer un bilan extrêmement positif de l'exécution de cette analyse de sensibilité, pourtant limitée et grossière.

Dans un premier temps, notons que la hiérarchie de la sensibilité des paramètres n'est pas véritablement proche de celle que l'on attendait, et qu'on a sans doute agit lors du paramétrage et du calibrage sur des paramètres qui n'étaient pas les plus déterminants. Cette étape d'évaluation qu'est l'analyse de sensibilité aurait sans doute gagné 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, peut-être que l'analyse de sensibilité n'aurait pas mis en avant les mêmes paramètres. Ceux-ci sont en interaction étroite, et il nous semble évident que les résultats de cette analyse de sensibilité sont eux même extrêmement sensibles au paramétrage de base.

Dans un second temps, l'analyse de sensibilité semble aller dans le sens d'une confirmation de la parcimonie du modèle. On l'a dit lors de l'analyse quantitative, mais il nous semble important de le répéter tant ce résultat est rassurant, mais aussi surprenant. 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 pense à minima comprendre à peu près son modèle et a des intuitions fortes sur les réactions de celui-ci aux différents mécanismes et paramètres, c'est une surprise très positive. 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.

Un autre point, classique, concerne les limites d'une telle analyse. L'approche entièrement quantitative, présentée dans l'introduction de cette partie, permet de s'affranchir des effets de mauvaise pondération 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. Dans un modèle comme SimFeodal, c'est-à-dire descriptif, exploratoire, et composé d'autant de paramètres hétérogènes, il semble toutefois illusoire de réussir à quantifier, pour une analyse

pour us 2 ind. ?
pas la même ?

difficile à suivre
(la je n'ai pas de
figura...) -
Faut 2 phras
tu a écrit
"très faible
sensibilité à l'aléa" ?
pas compris
pays. Faut
être + pédago

écrit autrement :
"Cette ADS, m si elle est
bien et précise, a
permis de mettre en évidence
des un certain no de
propriétés de paramétrage
d'apport des données.
extremement utile sur
le fait du modèle
fait à deux types :
d'éléments particuliers
ou qq chose dans
ce style

pourquoi ?

reformuler
trop de
surprises !

meilleure valorisation

?

nombre
pas clair -
Qu veut dire que le
ne verrait pas pertinent ?

de sensibilité, tout ce qui n'a pas été quantifié dans le modèle en lui-même : pondération des objectifs, objectivation des attendus dans les indicateurs graphiques etc.

pas d'aucun

C'un point de vue subjectif assumé, la démarche mise en place, basée sur le visuel, nous semble tout à fait fructueuse. Elle 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 et paraît confirmer l'adéquation de ce type d'approches à la construction et évaluation commune et interdisciplinaire de modèles.

à mesure
valable

La dernière partie de ce chapitre, tournée vers l'usage du modèle pour tester des scénarios thématiques, trouve ~~enfin~~ une justification supplémentaire, dans le champ méthodologique et de la modélisation cette fois-ci. Les brèves analyses de sensibilités ont en effet renforcé le besoin criant d'études plus approfondies des variations de certains paramètres, qui plus est quand ceux-ci trouvent des correspondances dans les connaissances empiriques.

idem

6.3 Comprendre le modèle par l'exécution de scénarios

Cette sous-partie est adaptée d'une partie d'un article collectif dont la première auteure est Cécile Tannier : Mettre la ref quand ce sera soumis.
Pour l'instant :

Tannier C., Cura R., Leturcq S., Zadora-Rio E. (2020), « An agent-based mo-delling to explore the combined effects of social and demographic changes on the hierarchy of rural settlement patterns in North-Western Europe du-ring the Middle Ages (800 CE to 1200 CE) - An application to the Tour's diocese, West of France ».

- On ne présente ici que 3 scénarios sur les 7 « familles » de scénarios testés dans l'article.
- Les simulations sont déjà effectuées et leurs résultats intégrés dans SimEDB.
- Cécile est en train de rédiger une analyse des résultats en anglais pour un article collectif.
- On présentera notamment les résultats de ces scénarios à l'ECTQG.
- => je les intégrerai une fois que ce sera déjà rédigé et que la sélection de graphiques/indicateurs aura déjà été faite, autant ne pas perdre de temps là dessus pour l'instant

expliquer comment j'ai choisi

?

OK

6.3.1 Tester l'hypothèse d'une croissance démographique

6.3.2 Modéliser la dépendance spatiale : le poids du servage

? Il ne s'agit pas de tester une hyp ?

6.3.3 Quel rôle ^{jouent} ~~et importance~~ des communautés paysannes dans la structuration du système de peuplement ?

Conclusion

A rédiger après les scénarios :

- Le modèle à l'issue de la phase de calibrage est globalement satisfaisant.
- L'analyse de sensibilité a montré quelques pistes potentielles d'amélioration.
 - Il serait pourtant difficile d'améliorer réellement le modèle : on entrerait dans de l'*overfitting*, aussi bien vis-à-vis de l'incertitude autour des *inputs* et paramètres non techniques que vis-à-vis de l'incertitude des données et connaissances expertes sur lesquelles on établit l'évaluation du modèle.
- Le modèle est toutefois déjà utile et utilisé, notamment avec l'exécution des scénarios qui nous semblent pouvoir donner de nouvelles hypothèses sur la période historique (croissance démo notamment).

à bien valoir

— Dans l'ensemble, la calibration, l'analyse de sensibilité et les scénarios servent certes un rôle de validation interne, mais surtout permettent aux co-concepteurs du modèle de mieux en comprendre le fonctionnement et les biais.

no — En cherchant à comprendre le fonctionnement du modèle, en cherchant à en raffiner le comportement, on effectue surtout un travail thématique poussé :

- formalisation des hypothèses,
- formalisation des attentes,
- recherche approfondie de sources et de documentation sur les différents faits stylisés/mécanismes implémentés dans le modèle.

acquiesse
connaissance
interne du
modèle ?

9 Afin de saisir
de effet
contributions des
aux interactions
mécanisme ?