

lena, rendu le
205/10/2018.

5.1

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

Version 2018-09-21

Sommaire

Introduction	2
5.1 Capter les sorties de SimFeodal	2
5.1.1 Masse des données	2
5.1.2 RéPLICATIONS	4
5.1.3 Expériences	6
5.1.4 Des données aux indicateurs	7
5.2 Comment explorer les données de SimFeodal ?	9
5.2.1 Observation en direct vs a posteriori	9
5.2.2 Générer les indicateurs	12
5.2.3 Organiser les indicateurs en rapports paramétrables . .	14
5.2.4 Organiser les rapports : Dashboards	17
5.2.5 Interagir avec les rapports : exploration interactive . .	19
5.2.6 Explorer en comparant : SimEDB	23
5.3 Organiser les données	26
5.3.1 Assurer la capacité d'interrogation des données	26
5.3.2 Structuration des données de SimFeodal	37
5.4 Une plate-forme d'exploration de données de simulations : SimEDB	43
5.4.1 Contraintes	43
5.4.2 Construire une plate-forme interactive pour l'évaluation de SimFeodal	49
Conclusion	61

Introduction

A faire

- > Définir notamment la démarche : contraintes générales -> spécificités SimFeodal -> choix méthodos/techniques

5.1 Capter les sorties de SimFeodal

Pour évaluer un modèle, on s'appuie sur plusieurs indicateurs de sortie de simulation, de types divers (indicateurs numériques, graphiques, cartographiques etc., cf. chapitre 3, partie théorique). Quand le nombre d'indicateurs devient important, comme c'est le cas dans le modèle SimFeodal (chap 3, partie présentation des indicateurs), la consultation des indicateurs pendant le déroulement d'une simulation devient difficile. La complexité de ces indicateurs augmente dans le cas d'un modèle stochastique comme SimFeodal, où il est nécessaire de multiplier les réplications afin d'avoir une idée fiable des tendances simulées par le modèle. Le travail de paramétrage d'un modèle requiert de plus de mener différentes expériences, c'est-à-dire de faire varier les paramètres (chap 4) du modèle, démultipliant encore la masse des sorties, et avec elle, la complexité de leur analyse. Nous détaillons ici les contraintes qu'entraînent ces différentes spécificités des données issues des simulations de SimFeodal.

général

5.1.1 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 une courbe de l'évolution du nombre d'agrégats au cours du temps, il faut avoir accès à cette information, et dès lors, enregistrer, à chaque pas de temps, cette valeur dans un fichier numérique adapté. Cette information, en tant que telle, est assez faible, aussi bien en valeur sémantique qu'en valeur prise en mémoire. Pour autant, on a montré que les indicateurs de sortie étaient nombreux, et avec eux, la quantité de valeurs à stocker augmente. Ainsi, à chaque pas de temps, il faudra enregistrer les valeurs de plusieurs variables. 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 18 lignes (le nombre de pas de temps de SimFeodal, cf. chap2, faire référence à page) et une cinquantaine de colonnes, ce qui serait assez raisonnable. si - 1 seul surv ?

Il faut toutefois prendre en compte un aspect important de l'exploration de données issues de simulations : la production de ces données a un coût temporel important, c'est-à-dire que l'exécution d'une simulation requiert un certain temps (3 à 4 minutes pour une exécution du modèle SimFeodal dans la version présentée dans le chapitre 2).

Avec la démultiplication des expériences et la nécessaire évolution du modèle au fur et à mesure de son évolution, il peut être extrêmement difficile, long et fastidieux de ré-exécuter l'ensemble des simulations précédemment effectuées. Les indicateurs peuvent évoluer au cours du temps de vie du modèle (cf. encadré chap 3), ou plus simplement, on peut être amené à réaliser une observation plus fine des sorties du modèle au fur et à mesure de la calibration de ce dernier. Par exemple, parmi les indicateurs de sortie de SimFeodal, on s'intéresse notamment à la composition des pôles, que l'on qualifie assez simplement d'une part avec le nombre

très peu relat.
à la + pour
des modèles
individu
à ce moment ?

rebonne le
phénomène

pas envoi expliqué
⇒ inverse l'ordre

glasch?

d'attracteurs qui les composent, et d'autre part avec l'attractivité qui en résulte. À mesure que la calibration du modèle progresse, et si tant est que les indicateurs choisis auparavant ne permettent plus de discriminer certaines variations fines dans les valeurs de paramètres, une étude plus fine du type d'attracteurs composant chaque pôle et de leurs propriétés spécifiques peut aider à discerner des différences entre ces jeux de paramètres et donc à les comparer. Cet exemple illustre des ajouts d'indicateurs de sorties, mais, plus pratiquement, on peut aussi être confronté à des modifications des indicateurs existants : le nombre de paroissiens moyen à chaque pas de temps peut être un indicateur utile au départ, mais l'on peut être amené à faire évoluer cet indicateur en une étude de la médiane, ou encore d'un indice de dispersion de la distribution par exemple, parce que la variabilité plus que la moyenne aurait tendance à augmenter au fur et à mesure du paramétrage du modèle. On se trouverait alors dans une situation impossible requérant de ré-exécuter les simulations après avoir adapté l'indicateur voulu.

En tenant compte de ces deux 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 le cas contraire, pour chaque changement ou ajout d'indicateur, il faudrait relancer des exécutions du modèle sur l'ensemble des jeux de paramètres précédents afin d'être en mesure d'avoir des indicateurs comparables entre les versions.

Enregistrer l'ensemble des variables d'un modèle est 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 comprend en effet bien plus de variables globales, représentant l'état du système dans son ensemble à chaque instant. Surtout, SimFeodal est un modèle qui voit interagir plusieurs sortes d'entités, chacune relatives à différents niveaux de granularité spatiale et sociale. Afin d'avoir tous les éléments en main une fois la simulation achevée, il est donc nécessaire d'enregistrer l'ensemble des variables non seulement globales, mais aussi afférentes à chacun des types d'agents. D'un unique tableau de données exhaustif en sortie du modèle de Schelling, on passe donc à plusieurs tableaux, dont les variables respectives seront propres à chaque type d'agent.

A ce niveau, l'information en sortie est encore relativement contenue : il y a cinq types d'agents ayant chacun une douzaine d'attributs, dans SimFeodal. On pourrait donc se contenter de ces cinq tableaux contenant 18 lignes (les pas de temps) et la douzaine d'attributs propres, comme c'est classiquement le cas dans ?¹.

Reste encore un obstacle majeur à un enregistrement suffisamment exhaustif du déroulement d'une simulation : une partie importante des indicateurs s'appuie sur des données individuelles et non agrégées. Ainsi, on peut, à chaque pas de temps, enregistrer le nombre de paroisses, leur superficie moyenne ou encore le nombre moyen de paroissiens que chacune dessert. Mais cela ne permet en aucun cas d'en dresser une cartographie, c'est-à-dire de réaliser une carte de la localisation et des aires d'attraction des paroisses. Cela demanderait, par définition, d'enregistrer la géométrie de chaque paroisse à chaque pas de temps, les configurations spatiales (localisation de chacune et donc distribution spatiale de l'ensemble) variant à chaque simulation.

Pour faire face à cette situation, on a donc fait le choix, dans SimFeodal, d'enregistrer les états des variables à des niveaux d'agrégation multiples, y compris au

1. RC : Trouver exemple de modèle SMA avec plusieurs types d'agents qui ont toutes un intérêt à être examinées spécifiquement, plutôt qu'au moyen d'un indicateur résumé classique (proie-prédateur, nb proies, nb prédateurs par exemple).

en schelling : nb. sujet / inscrits par cc.

niveau de l'agent, à chaque pas de simulation. Dans le cas des paroisses, le volume de données résultant reste contenu : on obtient un tableau d'environ 2000 lignes² et une dizaine de colonnes³. L'enregistrement systématique de chaque agent est toutefois bien plus gênant dans le cas d'autres agents, par exemple les foyers paysans. Pour ceux-là, et parce qu'on doit être en mesure d'étudier les liens entre les valeurs de satisfactions et les choix de déplacement, ou encore d'observer la composition précise de la distribution des satisfactions, il est aussi nécessaire d'enregistrer les attributs de chacun d'entre eux. Avec 4000 foyers paysans à chaque pas de temps, les données changent d'ordre de grandeur⁴ : 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.

A terme, pour enregistrer un état représentatif d'une simulation, c'est-à-dire disposer de suffisamment d'éléments numériques pour pouvoir générer les indicateurs de sortie et prévoir une partie de leur évolution, la masse de données produite est assez conséquente.

rendre concept ?

5.1.2 RéPLICATIONS

Comme on l'a vu dans le chapitre 3, une simulation ne suffit toutefois pas à évaluer le modèle. SimFeodal est ainsi un modèle stochastique, c'est-à-dire qu'une large partie des mécanismes qui l'animent sont basés sur des tirages aléatoires. Cet aléa est évident dans les mécanismes faisant appel à un tirage aléatoire explicite, par exemple le choix de déplacement ou non d'un foyer paysan (cf. chap2, mécanisme déplacement). Dans le cas de ce mécanisme, un foyer paysan mobile se déplacera selon une probabilité dépendant de sa satisfaction. Et s'il y a probabilité, il y a donc aléa. Même avec une forte satisfaction — 99% par exemple —, il reste donc 1% de chance qu'un foyer se déplace, ce qui, sur un grand nombre de tirages (chaque foyer paysan, à chaque pas de temps), aboutit à une probabilité de réalisation non négligeable. Et cette probabilité de réalisation sera encore supérieure pour des foyers paysans ayant des niveaux de satisfaction légèrement moindre mais cependant globalement très élevés, supérieurs à 90% par exemple. En analysant les sorties du modèle, on aura donc la présence d'*outliers*, qu'il sera important d'isoler, qui présenteront donc des comportements contre-intuitifs puisque résultant d'une probabilité extrêmement faible. L'aléa a donc un poids important dans ce type de mécanisme.

Même dans le cas de mécanismes plus anodins, l'aléa est tout de même fortement présent, puisqu'il est au cœur de la conception de SimFeodal. Ainsi, le simple ordre dans lequel les agents exécuteront un même mécanisme peut avoir une importance considérable. Par exemple, les seigneurs peuvent créer des châteaux, sous condition de puissance (cf. règle dans chap2). 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, ce qui devient rapidement le facteur principal de la limitation de l'apparition de châteaux. Si un seigneur puissant est souvent "appelé" en premier pour exécuter ce mécanisme, alors il pourra profiter des nouveaux agrégats disponibles pour créer ses châteaux. 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

2. Avec une moyenne de 120 paroisses, cela représente $18 \text{ [pas de temps]} \times 120 \text{ [paroisses]} \approx 2000$ lignes pour chaque simulation.

3. Les identifiants de la simulation (nom, graine aléatoire), le pas de temps, l'identifiant de la paroisse, puis les différents attributs et la géométrie.

4. $18 \text{ [pas de temps]} \times 4000 \text{ [foyers paysans]} \approx 70\,000$ lignes pour une exécution du modèle.

L'échelle de...
à chaque pas de temps



→ cette constraint
pas compris - OK -
mais 2 idées.
si peu puissant il
ne pourra créer de
nouveau château alors n'importe
qui 3 de n'importe
qui 3 de récurrence et
2^e idée : pourquoi
l'ordre ? pourquoi
si seuls ils pourront
peut-être vivre ?

de temps, alors plus de seigneurs seront en mesure de créer des châteaux, et la hiérarchie sera alors plus faible. L'ordre d'exécution, c'est-à-dire l'ordre aléatoire dans lequel les agents sont appelés pour exécuter leurs mécanismes, aura donc un impact important sur les indicateurs de sortie de simulation, sans que cet impact ne puisse être caractérisé au moyen d'indicateurs agrégés. Il est ainsi difficile de discerner, dans le comportement du modèle, ce qui relève d'une tendance simulée et ce qui relève de fines variations dues à l'aléa.

à dire
comme l'exemple

On pourrait objecter qu'en considérant les agents de manière agrégée, donc globale, les probabilités s'effectuent sur suffisamment d'individus pour présenter un résultat cohérent et robuste au niveau de la population dans son ensemble. En corollaire, le comportement de chaque agent serait régulé par tant de variables 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 vouloir ici entrer dans les détails des implications et raisons de ceci, on peut simplement en retenir qu'un modèle tel que SimFeodal est extrêmement sensible aussi bien aux conditions initiales qu'aux différents tirages aléatoires. A développer sérieusement ici, ou bien dans les chapitres 1 ou 2. Il faudra de toute façon faire un point quelque part sur les systèmes complexes, l'émergence etc. Pour illustrer, on peut s'appuyer sur un exemple, caricatural mais possible : à l'initialisation, tous les foyers paysans, placés aléatoirement dans l'espace, seraient concentrés dans un espace d'étendue restreinte. Seul un énorme agrégat émergerait donc, et aucun pôle ne serait susceptible dès lors de diviser cet agrégat géant. On atteindrait ainsi une situation très éloignée des configurations spatiales observées empiriquement, et très éloignée aussi des réalisations habituelles du modèle. En présence d'un seul agrégat, les possibilités de développement d'attracteurs (châteaux et paroisses) pourraient tout aussi bien être fortes que faibles. À partir ~~d'une telle~~ configuration initiale, on ne peut savoir si la situation convergerait vers un agrégat « paradisiaque », extrêmement développé et doté de pôles satisfaisants, ou au contraire, vers un agrégat « prison », où aucun des foyers paysans ne serait satisfait, mais n'aurait non plus d'alternative.

Cet exemple fictif, volontairement caricatural, ne s'est pas présenté jusqu'ici, mais le cas échéant il faudrait pouvoir le repérer, pour éventuellement l'isoler des autres simulations et ne pas le laisser influencer 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. Les réalisations aberrantes, soit parce qu'elles seraient issues d'un tirage aléatoire particulièrement défavorable, ou encore parce qu'elles apparaîtraient suite à une succession d'événements improbables qui s'auto-renforcent, peuvent donc apparaître à toute étape de la simulation, et déformer l'image renvoyée par les tendances simulées par le modèle.

+ finalement à la
seule nb. de
simulation initiale
éloigné de
l'empirique et une
l'incertitude
du résultat
Le pt. doit être
développé dans le
cadre de la
simulation initiale
ou de moins
distinguer les
autres de
tirages aléatoires.
cas f

On ne peut donc pas raisonner sur une unique simulation pour évaluer un jeu de paramètres (cf. chap 3), mais on ne peut pas non plus se contenter de récupérer le résultat des différentes réplications et d'en tirer une moyenne (selon qu'on s'intéresse par exemple à la tendance générale) ou un écart-type (si l'on cherche justement à observer les variations que peut entraîner l'aléa).

Pour ces raisons, et pour être en mesure d'embrasser l'entièreté diversité des sorties de simulations issues de variation de la graine aléatoire, il est donc nécessaire de mener plusieurs réplications de chaque simulation, et d'enregistrer

l'entièreté des sorties de simulations dans chacun des cas. Le jeu de données produit par une simulation, contenant quelques dizaines de milliers de lignes, est ainsi obligatoirement multiplié par le nombre de réplications. Pour l'exploration de SimFeodal, après différents tests, ce nombre a été fixé à 20 réplications (J'en aurais sans doute parlé dans le chapitre 3 (évaluation), mais à laisser ici jusqu'à ce que ce soit certain.). La dizaine de mégaoctet issue d'une simulation devient donc approximativement 200 mégaoctets, et le nombre de lignes contenues, par exemple pour les foyers paysans, passe d'à peu près 70 000 à 1 400 000⁵.

5.1.3 Expériences

Comme décrit dans le chapitre 4, le paramétrage de SimFeodal a demandé plusieurs étapes. De plus, chacune de ces étapes représente plusieurs sous-étapes – les expériences – faites d'essais et d'erreurs, en faisant varier à chaque fois les valeurs de paramètres de SimFeodal. Afin de construire le modèle, puis de l'explorer de manière plus systématique, il a été nécessaire de tester des dizaines de configurations de paramètres. Pour comparer, à chaque nouvelle version du modèle, les résultats produits par rapport aux résultats de la version précédente, il est indispensable de conserver, au minimum, l'ensemble des jeux de données de cette version précédente.

Cet archivage des résultats immédiatement précédents n'est pourtant pas suffisant, pour plusieurs raisons aussi bien éthiques que méthodologiques. En premier lieu, pour des impératifs de reproductibilité de la démarche engagée, aussi bien que pour la simple capacité à restituer correctement et rigoureusement les étapes suivies, il fallait conserver l'ensemble des indicateurs de sortie de simulations correspondant à chaque étape ou sous-étape. Cette démarche de paramétrage s'inscrivait ainsi sur une durée assez étalée, et suivant un avancement majoritairement non linéaire, fait d'allers-retours, et il était dès lors indispensable de documenter autant que possible chaque étape d'évolution du modèle, et pour cela, de conserver l'ensemble des résultats produits.

Si l'on ajoute les contraintes identifiées précédemment, c'est-à-dire la nécessité de conserver l'ensemble des données brutes plutôt que les seuls indicateurs de sorties, il apparaît qu'on ne peut mener un travail de paramétrage de SimFeodal sans conserver l'ensemble des données produites, c'est-à-dire l'ensemble des attributs de l'ensemble des agents, pour chacun des pas de temps, de chacune des réplications, tout cela pour chacune des expériences.

En supposant que les 8 étapes présentées dans le chapitre précédent (ref chap4, étapes) soient ne serait-ce que constituées de 3 sous-étapes chacune — ce qui est bien en deçà de la réalité —, on obtient 24 jeux de paramètres à stocker, puis à devoir mobiliser. Cela représente une somme considérable de données (voir table 5.1), qui se chiffrent en dizaines de millions d'enregistrement⁶. Si cela ne représente jamais que quelques gigaoctets de données, ce que quiconque a désormais l'habitude de manipuler dans un cadre personnel, en terme de traitement, cette masse de données est à la limite de ce que l'on peut traiter sur un ordinateur individuel. Ainsi, selon une approximation courante, on ne peut charger en mémoire de données d'une taille supérieure à la moitié de la mémoire vive disponible, sans même prendre en compte les autres éventuels processus en cours.

5. 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 toutefois déjà le maximum de lignes ($2^{20}, \approx 1 000 000$) que les tableurs classiques — LibreOffice ou Microsoft Excel dans leurs dernières versions en 2018 — sont en capacité de gérer.

6. $18 \text{ [pas de temps]} \times 4000 \text{ [foyers paysans]} \times 20 \text{ [réplications]} \times 24 \text{ [jeux de paramètres]} \approx 35 000 000$ de lignes enregistrées pour les seuls foyers paysans.

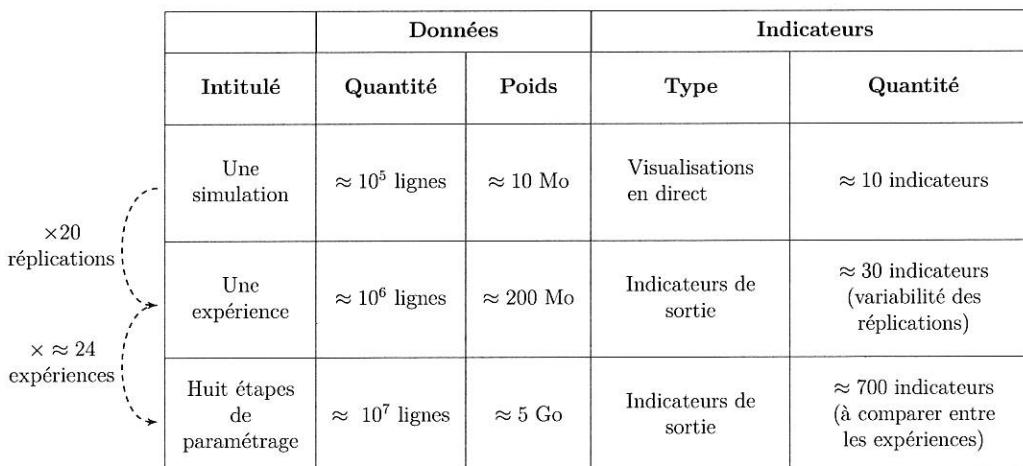
Avec 5 Go de données , il faut donc disposer d'un ordinateur personnel possédant au moins une douzaine de gigaoctets de mémoire vive, et encore, au prix d'un traitement extrêmement lent et bloquant.

Et encore, on ne mentionne ici que les expérimentations issues des étapes de paramétrage. Les phases suivantes d'exploration du comportement du modèle, par exemple relatives à l'analyse de sensibilité du modèle ou à sa calibration, demandent ainsi d'exécuter, et donc d'enregistrer, une masse bien plus importante de simulations.

5.1.4 Des données aux indicateurs

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

C'est particulièrement le cas pour SimFeodal, où l'on ne peut se contenter de produire à la volée les indicateurs, pour des raisons de reproductibilité théorique et pratique⁷.



Intitulé	Données		Indicateurs	
	Quantité	Poids	Type	Quantité
Une simulation	$\approx 10^5$ lignes	≈ 10 Mo	Visualisations en direct	≈ 10 indicateurs
Une expérience	$\approx 10^6$ lignes	≈ 200 Mo	Indicateurs de sortie	≈ 30 indicateurs (variabilité des réplications)
Huit étapes de paramétrage	$\approx 10^7$ lignes	≈ 5 Go	Indicateurs de sortie	≈ 700 indicateurs (à comparer entre les expériences)

TABLE 5.1 – Synthèse de la multiplication des données et indicateurs selon la hiérarchie des simulations.

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 traditionnel de la géographie quantitative, ne laissant par exemple pas la possibilité d'utiliser les outils à interface graphique classiques. Au contraire, face à des données de cet ordre, seules des solutions statistiques, basées sur des analyses en ligne de commande, peuvent être mobilisées. Ces solutions doivent en plus être appuyées par des capacités de calculs importantes, sans toutefois justifier encore l'usage de technologies de calcul intensif (« *High-Performance Computing* » -HPC -, mobilisé pour l'étude de données plus massives, i.e. trop importantes pour être analysées sur un unique ordinateur ou serveur). 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

7. La reproductibilité sera abordée « longuement » dans le chapitre 1 (positionnement).

(le + souvent)
aux thématiciens – qui ne disposent pas de ces compétences – : ils seraient alors en difficulté pour en tirer les analyses nécessaires à leur interprétation.

Analyser une masse d'indicateurs D'un point de vue thématique, et c'est là l'objectif, cette masse de données doit servir à la production d'indicateurs, nombreux et divers aussi bien dans leur forme que dans les caractéristiques des processus qu'ils décrivent (ref. chap. 3, indicateurs). Les mêmes raisonnements que pour les données s'appliquent ainsi aux indicateurs. Si on peut prendre en compte la variabilité des réplications directement dans les indicateurs produits (par exemple avec des représentations graphiques de type *box-plot* qui adoptent une forte partie des indicateurs), ce n'est ni possible ni souhaitable entre les différentes expériences. 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 24 expériences, cela fait donc déjà plusieurs centaines⁸ d'indicateurs (tableau 5.1).

Le choix ayant été fait de mener une comparaison visuelle (ref. dans chapitre 3 : indicateurs uniques vs fonctions objectifs), on imagine dès lors que celle-ci va être difficile en présence de tant d'indicateurs.

En sus de la contrainte de l'enregistrement et de la production des indicateurs, le verrou majeur à la compréhension des phénomènes modélisés dans SimFeodal est donc la simple capacité à visualiser et à explorer l'ensemble des indicateurs de sortie. Ce qui doit de plus être rendu accessible y compris pour un auditoire non habitué à la manipulation de nombreuses données et sorties quantitatives.

Tableau 5.1 TB.

Peut-être prendre davantage l'open
deux pour bien mettre le
niveau "monter en puissance"

8. En considérant ainsi une trentaine d'indicateurs, on obtient donc $30 \text{ [indicateurs]} \times 24 \text{ [jeux de paramètres]} \approx 700$ indicateurs uniques.