

Retour Anne le 13/11/2019

5

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

Version 2019-10-27

- 19/05/2019 : Reprises Lena + Envoi à Hélène
- 24/10/2019 : Reprises Hélène + Envoi à Anne
- 27/10/2019 : Correction des mockups qui produisaient des pdf buggés

C'est bien
mais pas forcément
un peu du

répétition.

Pourtant il y a

un peu d'anci.
+ synthèse

Sommaire

Introduction	1
5.1 Capter les sorties de SimFeodal	3
5.1.1 Masse des données	3
5.1.2 Tenir compte de la stochasticité du modèle - les réplications	3
5.1.3 Des réplications aux expériences	7
5.1.4 Des données aux indicateurs	9
5.2 Comment explorer les sorties de SimFeodal ?	10
5.2.1 Observer les simulations en direct ou <i>a posteriori</i>	12
5.2.2 Générer les indicateurs	12
5.2.3 Organiser les indicateurs en rapports paramétrables	16
5.2.4 Organiser les rapports : les dashboards	18
5.2.5 Interagir avec les rapports : exploration interactive	23
5.2.6 Explorer en comparant : la plateforme SimEDB	27
5.3 Organiser les données	32
5.3.1 Assurer la capacité d'interrogation des données	35
5.3.2 Structuration des données de SimFeodal	35
5.4 Une plate-forme d'exploration de données de simulations : SimEDB	49
5.4.1 Contraintes	57
5.4.2 Construire une plate-forme interactive pour l'exploration de sorties de simulation	57
Conclusion	67
	83

Introduction

A écrire une fois que le chapitre aura été découpé.

-> Définir notamment la démarche :

- contraintes générales
- + type explo SimFeodal
- -> choix méthodos
- + spécificités SimFeodal
- -> choix méthodos/techniques

Il faut effectivement
une intro pour
comprendre où tu mènes-
à-mener -

5.1 Capter les sorties de SimFeodal

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

Nous détaillons ici les contraintes qu'entraînent ces différentes spécificités des données issues de simulations. Ces contraintes sont transversales à plusieurs types de modèles, et on peut noter que certains autres types de modèles peuvent faire face à d'autres contraintes, propres ou génériques.

Dans l'ensemble, les modèles peuvent être amenés à soulever les problèmes génériques à la production de données, quelles qu'en soient la source. Cette recherche n'a pas vocation à dresser le portrait de l'ensemble des contraintes et solutions relatives à l'enregistrement et au stockage de données. Cette partie vise à identifier les plus fortes limites qui rendent difficile l'enregistrement des données issues d'un modèle de simulation à base d'agents, descriptif, fortement stochastique, et exploratoire tel que SimFeodal.

5.1.1 Masse des données

Facteur multiplicatif	Intitulé	DONNÉES		INDICATEURS		Type de question
		Quantité	Poids	Type	Quantité	
× 5000 [agents]	Un agent	1 ligne	≈ 200 octets	Visualisation en direct	Attributs de l'agent	Le comportement individuel des agents semble-t-il plausible ?
× 20 [pas de temps]	Un pas de temps	5 000 lignes	≈ 1 Mo	Visualisations en direct	3-4 indicateurs directs	Le déroulé d'une simulation semble-t-il correct ?
× 20 [réplications]	Une simulation	100 000 lignes	≈ 20 Mo	Visualisations en direct	≈ 10 indicateurs	
× 25 [expériences]	Une expérience	2 millions de lignes	≈ 400 Mo	Indicateurs de sortie	≈ 30 indicateurs (variabilité des réplications)	Quel est le comportement agrégé du modèle ?
× 100 [explorations]	Un modèle paramétré ou calibré	100 millions de lignes	≈ 10 Go	Indicateurs de sortie	≈ 3000 indicateurs (à comparer entre les expériences)	Peut-on obtenir un meilleur ajustement du modèle ?
	Un modèle exploré/connu	10 milliards de lignes	≈ 1 To	Indicateurs numériques synthétiques	—	Comment le modèle réagit-il aux variations de ses paramètres ?

TABLEAU 5.1 – Synthèse des questionnements liés à l'exploration de données issues de modèle et de la multiplication des données et indicateurs selon la hiérarchie des simulations.

Excellent

Le serait bien
de mettre
les logiques
un peu + petit

Dans un premier temps, il convient de noter que l'ensemble des indicateurs observés en sortie de SimFeodal reposent sur des données qu'il est nécessaire de produire et d'enregistrer tout au long de la simulation. Ainsi, pour pouvoir tracer le graphique de l'évolution du nombre d'agrégats au cours du temps, il faut avoir accès à cette information, et dès lors, enregistrer, à chaque pas de temps, cette valeur dans un fichier numérique adapté. Cette information, en tant que telle, est assez faible, aussi bien en valeur sémantique qu'en valeur prise en mémoire. La masse représentée par cette information est toutefois démultipliée par la quantité d'indicateurs de sortie : plus ces derniers sont nombreux, plus la quantité de valeurs à stocker augmente. À chaque pas de temps, il faudra enregistrer les valeurs de plusieurs variables (voir tableau 5.1). Cette pratique est habituelle, et un format de données tabulaire se prête bien à un tel enregistrement : une ligne pour chaque pas de temps, et une colonne pour chaque variable à enregistrer. On obtiendrait ainsi en sortie de simulation un tableau contenant 20¹ lignes et une cinquantaine de colonnes², ce qui serait assez raisonnable pour une unique simulation.

Évolution des indicateurs. Dans le cadre d'un modèle exploratoire (cf. chapitre 1), cette solution doit être écartée car elle ne permet pas de faire face à d'éventuelles évolutions des indicateurs au fur et à mesure du cycle de vie du modèle. Au fur et à mesure que le calibrage d'un modèle progresse, par exemple, on peut chercher à raffiner les indicateurs utilisés. Les indicateurs utilisés au départ peuvent alors ne plus montrer assez de variabilité entre des versions très proches de modèles. En effet, quand l'ajustement des données produites par la simulation aux objectifs empiriques s'améliore, il peut être difficile de départager plusieurs versions concurrentes d'un modèle. On peut alors chercher à créer de nouveaux indicateurs, qui donneront une information plus détaillée sur l'un des résultats de simulation.

On ajoute
de indicateurs
Est-ce qu'on
les supprime ?

filtrage peut
il fonctionner ?

Bien expliquer
le filtre -

Cet exemple illustre le cas des ajouts d'indicateurs de sorties, mais on peut aussi être confronté à des modifications des indicateurs existants. Dans SimFeodal, par exemple, le nombre de paroissiens moyen à chaque pas de temps peut être un indicateur utile au départ, mais on peut être amené à faire évoluer cet indicateur en une étude de la médiane si les nouvelles étapes de paramétrage du modèle en augmentent la variabilité.

Les indicateurs peuvent donc évoluer au cours du temps de vie du modèle (cf. encadré chap 3), ou plus simplement, on peut être amené à réaliser une observation plus fine des sorties du modèle au fur et à mesure de l'analyse de ce dernier. On se trouverait alors dans une situation impossible requérant de ré-exécuter les simulations après avoir adapté ou mis en place l'indicateur

1. Il s'agit ici du nombre de pas de temps de SimFeodal. On notera que ce nombre est particulièrement faible au regard de très nombreux modèles de simulation, en particulier vis-à-vis de ceux qui visent à provoquer l'émergence d'un phénomène. Ces modèles sont en général théoriques, et n'ont qu'une faible correspondance entre pas de temps et durée réelle du phénomène modélisé. Dans le cas de SimFeodal, où le temps est un élément crucial du modèle, la résolution temporelle du modèle ne peut être diminuée artificiellement (voir chap2, section 2.2.2.2), et l'on se satisfait donc de ce nombre d'itérations relativement faible.

2. Ce qui correspondrait par exemple à environ une colonne par indicateur, en plus des quelques colonnes de bases relatives à l'état d'ensemble de la simulation.

voulu.

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

Pour faire face à cette situation, on a donc fait le choix, dans SimFeodal, d'enregistrer les états des variables à des niveaux d'agrégation multiples, y compris au niveau de l'agent, à chaque pas de simulation. Dans le cas des paroisses, le volume de données résultant reste contenu : on obtient un tableau d'environ 2000 lignes³ et une dizaine de colonnes⁴. L'enregistrement systématique de l'état de chaque agent à chaque pas de temps est toutefois bien plus gênant dans le cas d'autres agents, par exemple les foyers paysans. Il est en effet nécessaire d'enregistrer les attributs de chacun d'entre eux pour être en mesure d'étudier les liens entre les valeurs de satisfactions et les choix de déplacement, ou encore d'observer la composition précise de la distribution des satisfactions. Avec 4000 foyers paysans au minimum à chaque pas de temps, les données changent d'ordre de grandeur⁵ : chaque simulation requiert de générer un fichier contenant des dizaines de milliers de lignes, pour un total, pour cet unique fichier, d'une dizaine de mégaoctets occupés.

Au final, l'enregistrement d'un état représentatif d'une simulation est difficile. Cela requiert de disposer de suffisamment d'éléments numériques pour pouvoir générer les indicateurs de sortie et rendre compte d'une partie de leur évolution. La masse de données produite est de ce fait nécessairement conséquente, comme indiquée dans la ligne « simulation » du tableau 5.1.

Coût temporel des simulations. Un dernier aspect de l'exploration de données issues de simulations, primordial, vient finir d'invalider l'approche d'enregistrement direct des indicateurs : le coût temporel. L'exécution d'une simulation requiert un certain temps de calcul (3 à 4 minutes pour une exécution du modèle SimFeodal dans la version présentée dans le chapitre 2). Ce temps de calcul ne peut être optimisé que dans des proportions faibles sans avoir à bouleverser l'implémentation des mécanismes, ce qui représenterait un coût temporel encore plus important (voir la succession d'étapes du chapitre 4). En l'état actuel du modèle, la production des données a donc un coût temporel

3. Avec une moyenne de 150 paroisses, cela représente $20_{[\text{pas de temps}]} \times 150_{[\text{paroisses}]}$ ≈ 3000 lignes pour chaque simulation.

4. Les identifiants de la simulation (nom, graine aléatoire), le pas de temps, l'identifiant de la paroisse, puis les différents attributs et enfin la géométrie stockée dans une colonne textuelle.

5. $20_{[\text{pas de temps}]} \times 4000_{[\text{foyers paysans}]} \approx 80\,000$ lignes pour une exécution du modèle.

Besoin d'info.
Multi
variables

X

3000
en

élevé. → Qu'est ce que ça coûte ? en temps ? Quelles contraintes ?

Qui plus est, ce coût est fortement dépendant du nombre de simulations exécutées : si le modèle est exploratoire, donc sujet à de nombreux changements, et notamment à l'ajout ou à la modification des indicateurs observés, il peut donner lieu à d'encore plus nombreuses simulations. Avec une structure de données fixe et agrégée, on ne pourrait introduire de nouveaux indicateurs, et la mise en comparaison des simulations précédentes impliquerait leur adaptation et re-production, c'est-à-dire la ré-exécution systématique de l'ensemble des simulations précédentes à chaque changement dans les indicateurs. L'introduction de nouveaux indicateurs est pourtant très fréquente, en particulier dans le cas d'un modèle exploratoire où l'on affine au fur et à mesure de l'évolution du modèle ce que l'on peut y observer.

En tenant compte de ces éléments, on a tout intérêt à se prémunir de ré-exécutions du modèle, et donc à enregistrer l'état de variables qui ne seraient pas encore mobilisées pour la production d'indicateurs. Dans l'exemple du nombre de paroissiens, il faudrait en enregistrer au minimum les moyennes, médianes, et sans doute quelques paramètres de dispersions en plus, voir les quantiles, afin d'adapter les indicateurs de sortie de la manière la plus adéquate aux sorties des différentes versions du modèle. Dans le cas contraire, pour chaque changement ou ajout d'indicateur, il faudrait relancer des exécutions du modèle sur l'ensemble des jeux de paramètres précédents afin d'être en mesure d'avoir des indicateurs comparables entre les versions.

Enregistrer l'ensemble des variables d'un modèle est aisé dans le cas d'un modèle théorique simple, par exemple dans le cas d'un modèle comme celui de Schelling (SCHELLING 1971). Cela se complique quand il s'agit d'enregistrer les variables d'un modèle plus complexe comme SimFeodal. Celui-ci requiert en effet bien plus de variables globales (ref chapitre 4, dans distinctions variables, paramètres etc.), pour représenter l'état du système dans son ensemble à chaque instant. Surtout, SimFeodal est un modèle qui voit interagir plusieurs sortes d'entités, chacune relatives à différents niveaux de granularité spatiale et sociale. Afin d'avoir tous les éléments en main une fois la simulation achevée, il est donc nécessaire d'enregistrer l'ensemble des variables non seulement globales, mais aussi afférentes à chacun des types d'agents. D'un unique tableau de données exhaustif en sortie du modèle de Schelling, on passe donc à plusieurs tableaux, dont les variables respectives seront propres à chaque type d'agent.

De plus, pour que les résultats de simulations soient comparables tout au long du développement du modèle, en dépit de l'évolution des indicateurs qui les constituent, il est nécessaire d'enregistrer l'état individuel des agents, et pas seulement des données agrégées. Cela démultiplie la quantité d'informations qu'il est nécessaire de stocker (ligne « simulation » du tableau 5.1), qui plus est quand le nombre d'agents est important⁶.

plus
et
encore plus
ce n'est pas
toujours beaucoup
↳ comment
c'est comparaison ?
Quelles sont les
contraintes ?

→ qui mais ça
n'implique
l'analyse.

6. Dans les dernières versions de SimFeodal, dont les résultats sont présentés dans le chapitre 6, on est passé de 4 000 foyers paysans à 40 000. On peut donc décupler les valeurs des colonnes « quantité » et « poids »....

5.1.2 Tenir compte de la stochasticité du modèle - les répli-cations

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

(cas singulier?)

Attention de ne pas reporter l'aléa comme un défaut du modèle. C'est aussi grâce à l'aléa, en utilisant

l'espérance, qu'on peut faire de bonnes choses, certes cocasses, mais plus sérieuses.

la statistique, c'est de savoir si l'on a pas fait ces types de monopole dans la réalité en nor-

Même dans le cas de mécanismes plus anodins, l'aléa est fortement présent, puisqu'il est au cœur de la conception de SimFeodal. L'ordre d'exécution, c'est-à-dire l'ordre aléatoire dans lequel les agents sont appelés pour exécuter leurs mécanismes, aura donc un impact important sur les indicateurs de sortie de simulation, sans que cet impact ne puisse être caractérisé au moyen d'indicateurs agrégés. Par exemple, les seigneurs peuvent créer des châteaux, sous condition de puissance (cf. chapitre 2, section 2.3.12). Pour créer ces châteaux, il faut que des agrégats soient « disponibles », c'est-à-dire ne comportent pas de château pré-existant à une certaine distance. Cette contrainte devient rapidement le facteur principal de la limitation de l'apparition de châteaux. Si un seigneur est plus souvent que les autres « appelé » en premier pour exécuter ce mécanisme, il pourra profiter des nouveaux agrégats disponibles pour créer ses châteaux. A force de création de châteaux, il sera relativement plus puissant, et pourra donc créer d'autant plus de châteaux relativement aux autres seigneurs. Il y aura donc une hiérarchie forte dans le nombre de châteaux possédés par seigneur.

Au contraire, si l'ordre d'appel des mécanismes favorise des seigneurs différents à chaque pas de temps, alors plus de seigneurs seront en mesure de créer des châteaux, et la hiérarchie sera alors plus faible.

Ces mécanismes sont sensibles à l'ordre d'appel, et il est ainsi difficile de discerner ce qui relève d'une tendance simulée et ce qui relève de fines variations dues à l'aléa, dans le comportement du modèle.

Un modèle complexe. On pourrait objecter qu'en considérant les agents de manière agrégée, donc globale, les tirages de probabilité seront appliquées à suffisamment d'individus pour que le résultat statistique soit cohérent et robuste au niveau de la population dans son ensemble. En corollaire, le compor-

Il faut donc faire aussi varier le modèle (on peut l'utiliser) par des histogrammes

tement de chaque agent serait régulé par tant d'états aléatoires qu'on entrerait dans le cadre d'application de la loi forte des grands nombres, les agents adoptant alors en moyenne un comportement proche de l'espérance (moyenne théorique) de chaque tirage. Avec ces considérations, on pourrait justifier la robustesse probable des différentes exécutions de SimFeodal.

SimFeodal n'est toutefois pas simplement un modèle stochastique, mais avant tout, un modèle complexe, c'est-à-dire s'inscrivant dans le champs des systèmes complexes. Sans vouloir ici entrer dans les détails des implications et raisons de ceci, on peut simplement en retenir qu'un modèle tel que SimFeodal est extrêmement sensible aussi bien aux conditions initiales qu'aux différents tirages aléatoires (voir l'analyse de sensibilité, chap 6, section 6.3).

→ Laisser les
Certainement
discuté.

TROP ?

Attention à ne
pas ~~attendre~~ de
tirer un coup
de pistolet dans
le pied -

→ Générique
ce n'est pas
des chiffres

On peut pas pas
faire x simulations
pour les analyser
et les considérer
+ ou - Réaliste

Alors peut-on faire
modèle et
les simulations
après tout ?

Anormaux , Aberrant, Mais pas impossible . Donc
intéressant -

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. → Or, mais l'avantage est du pouvoir
d'interdire ce cas. Réfléchir.

Cet exemple fictif, volontairement caricatural, ne s'est pas présenté jusqu'ici, mais le cas échéant il faudrait pouvoir repérer ce type de comportement aberrant. Cela serait par exemple utile pour éventuellement les distinguer des autres simulations et ne pas le laisser contrôler l'analyse d'un jeu de paramètres données. De plus, cet exemple concerne uniquement une configuration initiale qui présenterait des caractéristiques tout à fait exceptionnelles. Plus généralement, il existe un grand nombre de situations initiales potentielles éloignées de l'empirique et même du vraisemblable. Les réalisations aberrantes peuvent apparaître à toute étape de la simulation, et déformer les tendances observées dans les indicateurs de sortie du modèle. Au delà de l'initialisation, elles peuvent être issues de tirages aléatoires particulièrement défavorables, ou encore apparaître suite à une succession d'événements improbables qui s'autorenforcent. Pour distinguer ces réalisations aberrantes de ce que l'on pourrait caractériser d'une tendance normale, il est nécessaire de multiplier les réplications, afin de constituer un contexte suffisant pour isoler ces événements anormaux.

Enregistrement des réplications. On ne peut donc pas raisonner sur une unique simulation pour évaluer un jeu de paramètres (cf. chap 3). On ne peut pas non plus se contenter d'une agrégation des résultats des différentes réplications, sous la forme de moyennes ou d'écart-types, selon qu'on s'intéresse par exemple à la tendance générale ou qu'on cherche à observer les variations

que peut entraîner l'aléa.

Pour ces raisons, et pour être en mesure d'embrasser l'entièr diversité des sorties de simulations issues de variation de la graine aléatoire, il est donc nécessaire de mener plusieurs réplications de chaque simulation, et d'enregistrer l'entièreté des sorties de simulations dans chacun des cas. Le jeu de données produit par une simulation, contenant quelques dizaines de milliers de lignes, est ainsi obligatoirement multiplié par le nombre de réplications. Pour l'exploration de SimFeodal, après différents tests, ce nombre a été fixé à 20 réplications (*J'en aurais sans doute parlé dans le chapitre 3 (évaluation), mais à laisser ici jusqu'à ce que ce soit certain.*). La vingtaine de mégaoctets issue d'une simulation devient donc approximativement 400 mégaoctets, et le nombre de lignes contenues, par exemple pour les foyers paysans, passe d'environ cent mille à deux millions⁷ (voir la ligne « expériences » du tableau 5.1).

→ Ici c'est bien.

5.1.3 Des réplications aux expériences

Comme décrit dans le **chapitre 4**, le paramétrage de SimFeodal a demandé plusieurs étapes⁸. De plus, chacune de ces étapes représente plusieurs sous-étapes – les expériences – faites d'essais et d'erreurs, en faisant varier à chaque fois les valeurs de paramètres de SimFeodal. Afin de construire le modèle, puis de l'explorer de manière plus systématique, il a été nécessaire de tester des dizaines de configurations de paramètres. Pour comparer, à chaque nouvelle version du modèle, les résultats produits par rapport aux résultats de la version précédente, il est indispensable de conserver, au minimum, l'ensemble des jeux de données de cette version précédente.

Cet archivage des résultats immédiatement précédents n'est pourtant pas suffisant, pour des raisons tenant à la reproductibilité et à traçabilité du modèle obtenu au final. On serait en effet tenté, à chaque nouvelle version « majeure » du modèle, de ne conserver que les indicateurs de sorties des versions précédentes en considérant que le modèle a atteint une phase de maturité supérieure à chaque fois. Les étapes intermédiaires, reléguées au rang de brouillons ou d'esquisses, deviendraient alors inutiles. Le processus de conception et de paramétrage d'un modèle n'est pourtant pas linéaire (cf. **chapitre 4**), et on peut avoir besoin de comparer une version intermédiaire « actuelle » à une version intermédiaire précédente, quitte à réaliser qu'une modification erronée a été ajoutée au modèle.

La conservation des résultats de chacune des expériences joue donc à nouveau un rôle multiplicatif dans la masse de données à conserver (voir le tableau 5.1). En supposant que le modèle ait compté environ 25 versions⁹, on obtient envi-

7. Si cette quantité de données semble tout à fait raisonnable et peut largement être traitée sur un ordinateur classique, on peut toutefois noter qu'elle dépasse déjà le maximum de lignes (limitées à 2^{20} , soit un peu plus d'un million) que les tableurs classiques – LibreOffice ou Microsoft Excel dans leurs dernières versions – sont en capacité de gérer.

8. **Y mettre un tableau avec les versions + nombre de sous-version du modèle.**

9. Dans SimFeodal, par exemple, on distingue 6 versions « majeures » (cf. **tableau dans chap 4**, elles-mêmes composées de 4 à 10 sous-versions) à corriger quand tableau finalisé.

ron 500 simulations à stocker, puis à devoir analyser et comparer. Cela représente une somme considérable de données (voir tableau 5.1), qui se chiffrent en dizaines de millions d'enregistrement¹⁰.

En matière de stockage, il ne s'agit jamais que de quelques gigaoctets de données, pourtant à la limite de ce que l'on peut traiter sur un ordinateur individuel¹¹.

On ne mentionne ici que les expérimentations issues des étapes de paramétrage. Les phases suivantes, visant à l'exploration du comportement du modèle (analyse de sensibilité, calibration...), demandent ainsi d'exécuter, et donc d'enregistrer, une masse bien plus importante de simulations.

5.1.4 Des données aux indicateurs

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

C'est particulièrement le cas pour SimFeodal, où l'on ne peut se contenter de produire à la volée les indicateurs pour des raisons de reproductibilité¹².

Analyser une masse de données. La masse de données en sortie est impressionnante et requiert dès lors, d'un point de vue technique, d'utiliser des outils adaptés à la manipulation de grands jeux de données. Cela exclut de fait l'outillage habituel, accessible, de la géographie quantitative, ne laissant par exemple pas la possibilité d'utiliser les outils à interface graphique classiques. Au contraire, face à des données de cet ordre, seules des solutions statistiques, basées sur des analyses en ligne de commande, peuvent être mobilisées. Ces solutions doivent en plus être appuyées par des capacités de calcul importantes, sans toutefois justifier encore l'usage de technologies de calcul intensif¹³. Cela pose une contrainte dans l'accessibilité aux analyses : le traitement des données requiert des compétences spécifiques en analyse de données volumineuses. Dans un contexte interdisciplinaire caractérisé par une large hétérogénéité en matière de pratiques quantitatives, il n'est pas possible de se contenter d'envoyer les jeux de données produits aux thématiciens – qui ne disposent le

10. $20 \text{ [pas de temps]} \times 5000 \text{ [agents]} \times 20 \text{ [réplications]} \times 25 \text{ [jeux de paramètres]} \approx 100\,000\,000$ de lignes enregistrées pour les agents (4 000 foyers paysans et environ 1 000 autres agents).

11. Selon une approximation courante, on ne peut charger en mémoire des données d'une taille supérieure à la moitié de la mémoire vive. Approximation qui approche du tiers quand on prend en compte les autres processus en cours, et éventuellement des modifications à l'échelle de l'ensemble du jeu de données plutôt que sur des extraits. Pour pouvoir traiter ces 5 Go de données (tableau 5.1), l'ordinateur utilisé doit donc disposer d'au moins 16 gigaoctets de mémoire vive, et encore, au prix d'un traitement potentiellement lent et bloquant.

12. La reproductibilité sera abordée dans le chapitre 1 (positionnement).

13. Le « High-Performance Computing » (HPC) par exemple, mobilisé pour l'étude de données plus massives, c'est-à-dire trop importantes pour être analysées sur un unique ordinateur ou serveur. Voir REY-COYREHOURCQ (2015, p. 223–283) pour un historique détaillé des usages HPC en SHS, et particulièrement en géographie.

Quel est
le problème =
le stockage
ou
l'Analyse
(donc les contraintes
de comparaison
permettent)

Important.
avec ces chiffres
on ne comprend
pas bien le
bloquage d

plus souvent pas de ces compétences – : ils seraient alors en difficulté pour en tirer les analyses nécessaire à leur interprétation.

Analyser une masse d'indicateurs. D'un point de vue thématique, et c'est là l'objectif, cette masse de données doit servir à la production d'indicateurs, nombreux et divers aussi bien dans leur forme que dans les caractéristiques des processus qu'ils décrivent (ref. chap. 3, indicateurs). Les mêmes raisonnements, « multiplicatifs », que pour les données s'appliquent ainsi aux indicateurs. On peut rendre compte de la variabilité des réPLICATIONS directement dans les indicateurs produits (par exemple avec des représentations graphiques de type *box-plot*, utilisés ici pour une large partie des indicateurs).

La production de tels indicateurs au niveau de la variabilité inter-expérience est pourtant difficile, si tant est qu'elle soit souhaitable. De fait, chaque expérience doit pouvoir être comparée aux précédentes sur la base de leurs seules réPLICATIONS respectives. Dès lors, la raison d'être des indicateurs de sortie est de rendre possible une comparaison, indicateur par indicateur, entre chacune des expériences. Il est donc indispensable de générer, pour chaque expérience, l'ensemble des indicateurs. En ne considérant ici encore que 25 expériences, cela fait donc déjà plusieurs centaines¹⁴ d'indicateurs (tableau 5.1).

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

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

→ on a été bie
la difficulte
les k ressout
pour analyser
de facor pertinent
le scrit de
modèle -

/ la dépend
ce que l'on
regarde ...

) → fff ...

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

5.2 Comment explorer les sorties de SimFeodal ?

Pour évaluer, de manière approfondie, une expérience (voir tableau 5.1) d'un modèle tel que SimFeodal, il est nécessaire de passer en revue de nombreux indicateurs de sortie de simulation. Cette évaluation ne vise pas à produire une « note » unique et synthétique, mais plutôt à tester la capacité de l'expérience à reproduire les dynamiques que le modèle cherche à reproduire. Il ne s'agit pas, à proprement parler, d'une validation du modèle, au sens quantitatif où on pourrait l'entendre.

On vise plutôt à explorer le comportement du modèle en fonction des mécanismes et valeurs de paramètres choisis. Cela aboutit donc sur un jugement qualitatif sur la capacité du modèle à reproduire les dynamiques souhaitées. Pour mener cette exploration, il convient d'utiliser des outils adaptés, c'est-à-dire de disposer de solutions techniques permettant le calcul et l'affichage des indicateurs à partir des données produites par le modèle.

Dans le travail mené autour de SimFeodal, plusieurs solutions ont été utilisées au cours des différentes étapes de construction du modèle. La restitution purement chronologique de ces solutions ne revêt pas d'intérêt propre, mais les contraintes accumulées au cours de la construction du modèle ainsi que les choix devant permettre de les dépasser nous paraissent très largement génériques et généralisables.

La succession de choix d'outils d'explorations se justifie par les verrous dans l'exploration que chacun de ces outils a permis de débloquer. Cela dresse par là-même un portrait des solutions méthodologiques d'exploration de données de simulations dont on peut faire usage selon les contraintes générales des modèles.

oni.
mais aussi
répondre la
distribution
(réfléchir)
des fonctions...

5.2.1 Observer les simulations en direct ou *a posteriori*

Classiquement, le premier réflexe d'un modélisateur, du moins pour les modèles à base d'agents, est de définir des sorties graphiques pour accompagner son modèle. Les différentes plate-formes de modélisation agent mettent d'ailleurs régulièrement en avant les possibilités de représentations qu'offrent leurs environnements¹⁵. Visualiser le déroulement d'un modèle « en direct » (« *online* » dans GRIGNARD et DROGOUL 2017), c'est-à-dire au sein de la plate-forme de simulation et au cours l'exécution du modèle, offre ainsi de nombreux avantages : évaluation visuelle du niveau de ségrégation (et de son évolution) dans une implémentation du modèle de Schelling; visualisation de cohérence du déplacement des nuées d'oiseaux dans un modèle de type « Flocks » (REYNOLDS 1987); ou encore suivi d'un indicateur dans le temps – la quantité de ressources collectées – dans un modèle de type « Sugarscape » (EPSTEIN et AXTELL 1996).

15. Voir par exemple les collections de visualisations sur les pages d'accueil de Gama (<https://gama-platform.github.io/>), de NetLogo (<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>), de GeoMASON (<https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/extensions/geomason/>) ou encore de Repast (<https://repast.github.io/screenshots.html>).

Visualisation des simulations en direct. Il est à noter que dans le cadre du développement d'un modèle de simulation, l'implémentation du modèle et de son interface graphique sont étroitement liées. D'une part, la plateforme de modélisation choisie constraint fortement le type et la diversité des représentations. Gama et GeoMASON, par exemple, proposent des modes de visualisation de données géographiques bien plus avancés que NetLogo ou Repast. L'interface graphique développée pour chaque modèle est donc largement influencée par la plateforme de simulation dans laquelle il est exprimé. D'autre part, dans la plupart de ces plateformes de simulation, l'interface graphique est implémentée au même niveau que le code-source du modèle en lui-même. Dans NetLogo et Gama par exemple, l'interface graphique est programmée directement dans le modèle en lui-même, en se basant sur les variables qui y sont déclarées. Il n'est donc pas possible de créer une interface graphique générique au sein des plateformes de simulation, laquelle pourrait s'appliquer à plusieurs modèles différents. Il est nécessaire, pour chaque modèle, de reconstruire l'interface depuis les briques de bases proposées par les plateformes, c'est-à-dire un ensemble de primitives graphiques permettant de composer une interface intégrée au modèle.

Dans l'exploration de SimFeodal, la création en direct de quelques graphiques correspondant à des indicateurs étudiés permet d'assurer un rôle de filtrage, grossier, à l'exécution d'une expérience, c'est-à-dire de l'ensemble des réplications nécessaires à son évaluation. Après une modification du code-source du modèle, et avant de lancer de nombreuses simulations, on exécute quelques simulations « manuellement ». On s'assure alors, en direct, que les indicateurs affichés ne présentent pas de caractères aberrants. Cela permet de vérifier, avant de lancer des calculs plus conséquents, que le déroulement de la simulation semble cohérent, c'est-à-dire, le plus souvent pour des modifications mineures du modèle, qu'un *bug* n'a pas été introduit involontairement.

chape type
de visualisation
et sa fonction.

Le recours à ce type de visualisation en direct des simulations ne peut toutefois être généralisé, c'est-à-dire sorti de son rôle de pré-filtre, en raison de deux principales contraintes.

Visualisation en direct et réplication. La première contrainte, déjà évoquée plus haut, est que le modèle SimFeodal est fortement stochastique. Dès lors, la visualisation des indicateurs d'une simulation particulière n'est pas suffisante pour estimer le comportement du modèle. En conséquence, les indicateurs choisis pour l'évaluation de SimFeodal prennent presque tous en compte la variabilité des résultats induite par l'exécution de réplications. Certaines plateformes de simulation multi-agents¹⁶ permettent toutefois de mener concurremment plusieurs réplications d'un même modèle et de visualiser directement pendant l'exécution les résultats agrégés des réplications. Cette première contrainte, liée au besoin d'analyser des réplications plutôt que des exécutions isolées, peut donc être dépassée en adaptant l'implémentation du modèle pour faire usage de ces capacités de multi-simulation.

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

Visualisation multi-indicateurs. La seconde contrainte est cruciale dans le cas de SimFeodal et invalide l'usage des méthodes de visualisation en direct. On l'a vu, l'exploration des sorties de simulation du modèle repose sur la consultation systématique de plusieurs indicateurs, dont le nombre peut se révéler important pour une analyse approfondie.

Tout d'abord, il est concrètement difficile de représenter tous ces indicateurs au sein de l'interface graphique d'une plate-forme de simulation agent, comme on peut le remarquer, par exemple en figure 5.1 : l'espace occupé par les quelques indicateurs temporels et numériques affichés est déjà important et rend l'interface d'ensemble complexe. De plus, et c'est sans doute le verrou majeur, la temporalité de l'exécution d'une simulation – ou même des réplications nécessaires – est bien plus courte que celle requise pour la compréhension des résultats produits. Une simulation requiert ainsi au maximum quelques minutes. Pour pouvoir examiner tous les indicateurs pendant cette durée, il serait nécessaire de mettre la simulation en pause régulièrement, presque à chaque pas de temps. On disposerait alors d'un temps suffisant pour observer les indicateurs (organisés en onglets dans l'interface visible dans la figure 5.1). L'analyse des indicateurs de sortie de simulation demandent en effet un examen approfondi, et non simplement superficiel, pour pouvoir juger de l'adéquation de ce que ces indicateurs représentent vis-à-vis des attentes thématiques.

tempo cognitif

taux moyen

Visualisation différée. Cette contrainte est renforcée par la pratique d'évaluation que la plupart des chercheurs mobilise. L'évaluation n'est pas une étape unique et finie, il est utile de pouvoir revenir sur les résultats à différents moments. Cela est par exemple nécessaire quand il s'agit de comparer de nouveaux résultats produits à ceux générés par des expérimentations antérieures. On ne peut alors se contenter d'évaluations en direct, même en y consacrant un temps important, simplement parce que par nature, ces évaluations seront à reproduire en plusieurs occasions, et qu'il ne serait alors pas rationnel de relancer, à chaque fois, de nouvelles simulations correspondant à des configurations de paramètres et de mécanismes déjà éprouvées.

Visualisations multiples. Un dernier élément contribue à la difficulté de se baser sur une évaluation en direct : en plus du chercheur, amené à revenir de multiples fois sur les résultats d'une expérience, un modèle co-construit peut être évalué par plusieurs chercheurs différents. C'est d'autant plus fréquent en situation d'interdisciplinarité, où les points de vue de chacun des membres sont complémentaires et nécessaires. Sauf à faire preuve d'une discipline exacerbée, par exemple en réalisant l'ensemble du travail d'évaluation uniquement en séances de travail simultanées et collectives, l'évaluation par plusieurs personnes demande que chacun puisse mener ces analyses selon ses propres temporalités. En choisissant de baser l'évaluation d'un modèle uniquement sur une analyse en direct, il faudrait alors que chaque chercheur, à chaque fois qu'il souhaite évaluer une même expérience, ré-exécute le modèle de nombreuses fois. Cela serait naturellement possible, mais constituerait clairement un gâchis certain de ressources.

L'évaluation d'un modèle interdisciplinaire et exploratoire ne peut donc que

difficilement être réalisé en direct, qui plus est quand elle demande de faire appel, dans un cadre de co-construction, à plusieurs points de vue hétérogènes. Les modalités mêmes de l'exploration des sorties d'un modèle à évaluation visuelle requièrent donc que les indicateurs soient accessibles et explorables à des temporalités différentes, par des chercheurs différents, depuis des lieux divers.

Il est donc indispensable que les indicateurs soient enregistrés et consultables simplement à tout moment, *a posteriori* des simulations, ce qui élimine de fait la visualisation des indicateurs en direct pendant l'exécution des simulations comme unique méthode d'exploration du comportement des modèles exploratoires et descriptifs.

Et qu'ils soient
compréhensibles

Représentations -

1 sur état

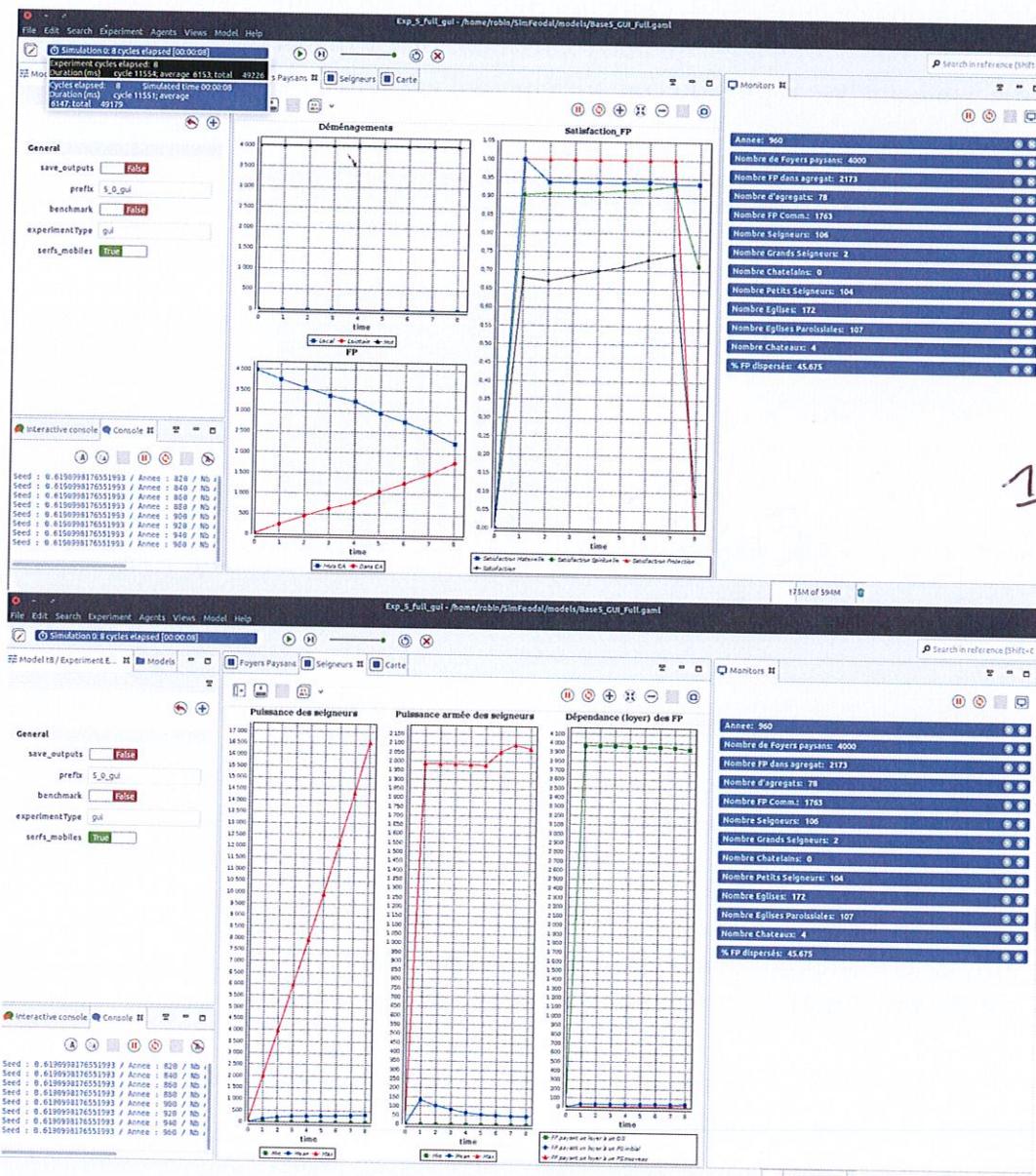


FIGURE 5.1 – Indicateurs intégrés à l'interface graphique interne de SimFeodal. Dans ces captures d'écrans, il s'agit d'indicateurs liés aux foyers paysans et aux seigneurs.

Visualiser en direct pour pré-filtrer. Dans le cadre de la construction et du paramétrage de SimFeodal, nous avons cependant mobilisé ce type de visualisation en direct, comme on peut le constater dans l'interface graphique

du modèle (figures 5.1 et 5.2). La visualisation en direct n'est donc pas mobilisable en tant que méthode d'évaluation principale, mais elle peut tout de même, comme dans un usage très classique, être utilisée comme un outil de validation interne pour tester chaque modification dans les valeurs de paramètres, remplissant alors le rôle de « préfiltre » décrit auparavant. Visualiser une seule simulation, avant d'en exécuter les réplications nécessaires, permet ainsi déjà de vérifier que les modifications apportées dans les valeurs de paramètre ou dans les mécanismes n'ont pas entraîné l'apparition de bugs ou d'incohérences immédiatement visibles.

Nous avons donc choisi de développer une interface graphique, très sommaire mais permettant des allers-retours rapides entre l'implémentation et l'exécution, au sein de l'implémentation de SimFeodal. Cette interface n'affiche qu'un nombre réduit d'indicateurs (figure 5.1), ainsi qu'une représentation cartographique (figure 5.2) utile à une analyse rapide du comportement d'ensemble du modèle.

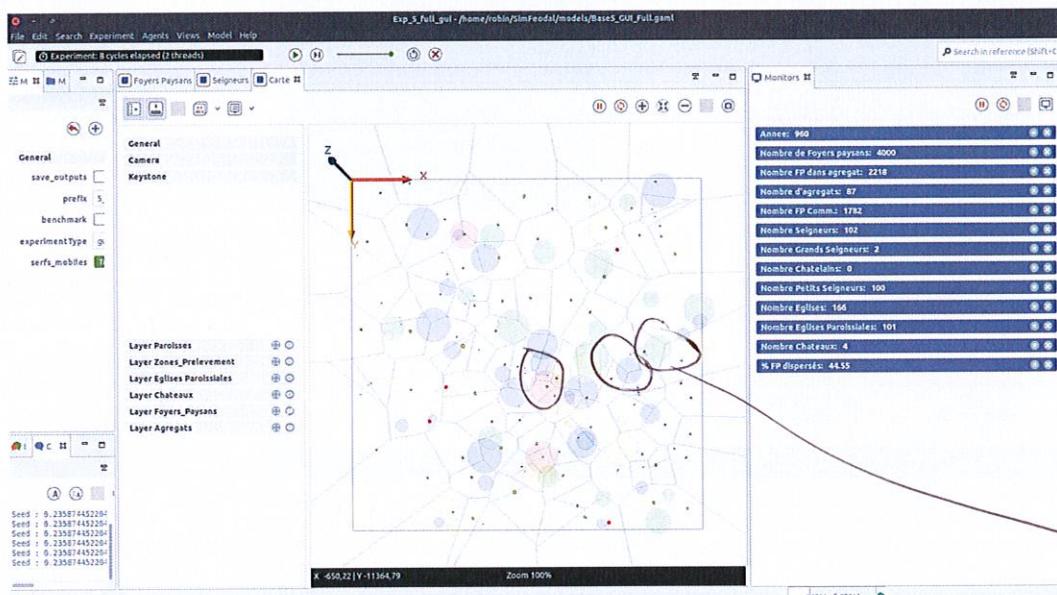


FIGURE 5.2 – Visualisation intégrée à l'interface graphique interne de SimFeodal : cartographie synthétique de l'espace modélisé.

Ces indicateurs intégrés à l'interface graphique interne de SimFeodal permettent de mener une étape préalable à l'évaluation du modèle. Cette étape vise à effectuer un premier filtrage des simulations avant d'exécuter les expériences en elles-mêmes. L'ajout de cette interface graphique vient donc renforcer l'outillage d'évaluation de SimFeodal. A cette étape, il manque encore un outil véritablement adapté à l'analyse conjointe des réplications du modèle, a posteriori de l'exécution des nombreuses réplications.

5.2.2 Générer les indicateurs

La production des indicateurs doit nécessairement être réalisée en aval de l'exécution des simulations – « offline » dans GRIGNARD et DROGOUL (2017). Il faut pour cela disposer d'outils adaptés au traitement des données produites, c'est-à-dire répondant aux contraintes identifiées auparavant (sous-section 5.1.4).

La contrainte principale est d'être en mesure de gérer la masse de données produites. On l'a vu, cela élimine d'office les outils de type tableurs, ou encore les outils de manipulation graphique de données les plus courants. Pour les raisons évoquées dans le chapitre 1 (**Positionnement : pourquoi utiliser des outils libres ?**), seules les solutions techniques libres étaient envisageables.

Interfaces graphiques (GUI) ou en lignes de commande (CLI) Certains outils graphiques (*GUI – Graphical User Interface*), basés sur des logiciels libres en arrière-plan (PSPP, R Commander, Orange), sont extrêmement aisés à prendre en main et auraient pu constituer un bon choix. Pourtant, avec une trentaine d'indicateurs à produire pour chaque expérience, donc de manière régulière, nous avons préféré nous tourner vers des outils plus orientés vers une interface en ligne de commande (*Command Line Interface*, abrégés *CLI*).

L'utilisation de *CLI* a plusieurs intérêts gravitant autour de la reproductibilité des traitements. En premier lieu, ils permettent une adaptation aisée et rapide aux différents jeux de données. Ainsi, partant du principe que les données générées par les réPLICATIONS et expérIMENTATIONS sont de même structures, il suffit généralement de modifier le chemin d'entrée des fichiers résultants pour reproduire à l'identique une analyse sur un nouveau jeu de données.

De manière plus technique, on peut remarquer que les différents indicateurs de sortie de simulation *choisis* présentent souvent des caractéristiques communes, aussi bien dans le traitement nécessaire que dans les formats (graphiques) produits.

Quels ?

Des outils CLI pour l'analyse de données. Par exemple, la grande majorité des indicateurs reposent sur une première agrégation des données par réPLICATION et pas de temps simulé, puis par une seconde agrégation montrant la variabilité des situations générées, au niveau de l'expérIMENTATION¹⁷. En terme de manipulation de données, seuls le calcul de la variable à mobiliser, et éventuellement l'agent caractérisé sont ainsi à adapter dans ces nombreux indicateurs de sortie. La variabilité du nombre de foyers paysans et la variabilité du nombre d'agrégats ne diffèrent que par le type d'agent sur lequel le calcul est effectué par exemple. Les variations, en terme de code-sources, sont donc le plus souvent des adaptations minimes (nom de l'agent, type d'agrégation...). Le recours à des traitements en *CLI* permet ainsi un simple copier/coller, voir la création de fonctions dédiées, pour effectuer ces traitements très récurrents.

Des outils CLI pour la visualisation. Au niveau des sorties graphiques, on peut aussi remarquer que la structure des graphiques, en elle-même, est assez largement identique : on représente les pas des temps (les années simulées) en abscisse, un indicateur statistique en ordonnée, et la variabilité sous la

17. On peut considérer ces agrégations comme une succession d'opérations imbriquées : pour montrer l'évolution d'un indicateur tel que le taux de foyers paysans dispersés au cours du temps simulé, il faut (1) calculer le ratio entre nombre de foyers paysans dispersés et nombre total de foyers paysans, (2) pour chacun des pas de temps simulé, (3) pour chaque simulation, (4) pour l'ensemble des réPLICATIONS d'une expérience, (5) éventuellement pour chacune des expériences d'une phase plus large d'expérIMENTATION qui ferait varier des valeurs de paramètres.

Mais est-ce
abordable
par tous ?
peut-être
plus discipliné
à l'avenir de
la sauvegarde ?

Quelles compétences
requiert ?

Quelle
mémoire ?

forme de *box-plot* minimalistes (« *minimal boxplot* », promus par Edward Tufte pour minimiser le ratio données-encre (TUFTE 2001, p. 123-125)). En disposant d'un environnement de type *CLI*, et qui plus est en faisant usage de solutions graphiques construites sur une syntaxe régulière et générique (voir Fluidifier les étapes de rendu : le « pipeline de visualisation », section 5.4.2.1), il devient très confortable de générer les différents indicateurs de sortie souhaités, puisqu'il suffit d'adapter les graphiques déjà conçus.

Avec ces solutions logicielles d'analyse de données et de visualisation, il est facile de concevoir et d'implémenter les codes informatiques nécessaires à la génération des indicateurs de sortie de simulation. De plus, l'exécution de ces programmes est extrêmement rapide : les différents fichiers de sortie de simulation sont lus et parcourus une unique fois pour en tirer toutes les variables nécessaires à l'établissement des indicateurs.

En ayant choisi de mener une évaluation *a posteriori* – plutôt qu'en direct – basée sur l'observation d'indicateurs générés – par des outils adaptés au traitement de données massives – de manière automatisée, on dispose donc, pour chaque expérience, d'un ensemble de fichiers numériques : chacun des indicateurs de sortie est contenu dans un fichier unique, dans un format facilement exploitable et ré-utilisable.

5.2.3 Organiser les indicateurs en rapports paramétrables

Du point de vue de la manipulation, la création de fichiers informatiques indépendants correspondant aux différents indicateurs de sortie de simulation est extrêmement pratique : on peut facilement les identifier, les transférer et les adapter, par exemple pour en rendre le contenu plus compréhensible par un public différent.

En revanche, du point de vue de la comparaison des résultats, cette forme n'est pas la plus adaptée. Si l'on peut facilement comparer un même indicateur portant sur deux expériences différentes, la tâche se complique quand il s'agit d'avoir une vision globale des différences dans les indicateurs entre deux expériences. Pour cela, la démultiplication des fichiers correspondant aux indicateurs se révèle rapidement être un obstacle : l'utilisateur est en effet amené à jongler entre de très nombreux fichiers.

Les rapports comme instruments de comparaison. Pour faciliter la comparaison d'indicateurs multiples – et d'une forte diversité –, il est nécessaire de les organiser au sein d'une structure englobante. Nous entendons ici par organisation, une présentation structurée, suivant un certain ordre, identique selon les expériences, adaptée à une évaluation des résultats. Pour cela, nous avons choisi d'organiser les indicateurs de sortie de simulation au sein de « rapports ». Cela permet, même en présence de nombreuses expériences, de rassembler l'ensemble des indicateurs de sortie propres à chacune dans un unique fichier, à la structure toujours similaire. Un premier apport, majeur, concerne l'archivage des sorties de simulation. Avec des rapports comprenant l'ensemble des indicateurs de sortie de chaque expérience d'un modèle, il est

mais on peut
écrire des
fcts qui
comparent
les états
automatiquement.

ainsi simple de conserver des traces de l'ensemble des versions et sous-version d'un modèle. Cela permet de garantir une certaine pérennité à ce modèle, à sa documentation, et ainsi simplifie le travail rétrospectif de caractérisation de l'évolution d'un modèle.

L'intérêt majeur de la structuration en rapports est surtout de faciliter la comparaison des expériences, c'est-à-dire des indicateurs de sortie des différentes expériences. On peut ainsi, par exemple, placer côté à côté, visuellement, deux rapports rendant compte de deux expériences différentes, et, en les faisant défiler simultanément, comparer point par point, c'est-à-dire indicateur par indicateur, leurs résultats respectifs, de manière visuelle et intuitive.

Les formes que peuvent prendre des rapports, tout autant que les modalités de leur production, sont multiples et extrêmement diverses. La forme la plus simple et courante consiste à produire manuellement le rapport en insérant les indicateurs adaptés au fur et à mesure, par exemple dans un traitement de texte. A l'opposé, on peut noter les possibilités de créations entièrement automatisées de rapports complets, comprenant par exemple des descriptions et commentaires textuels générés à la volée, en fonction d'expressions conditionnelles¹⁸.

*similarités
(jundet
enemys)*

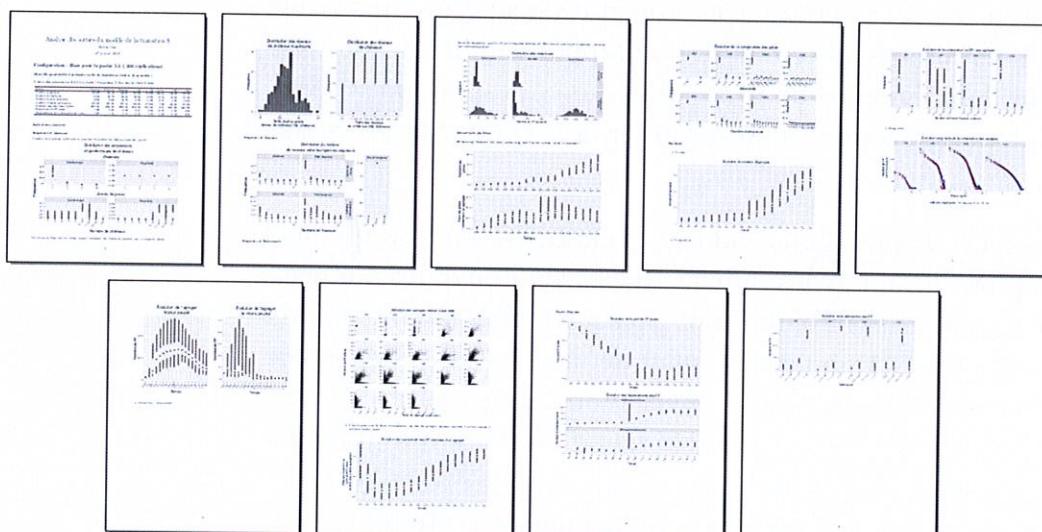


FIGURE 5.3 – Un exemple, miniaturisé, de rapport automatique généré pour une expérimentation (étape 0) de SimFeodal.

Pour SimFeodal, nous avons choisi de restreindre au maximum la manipulation manuelle. On souhaitait générer un rapport entièrement automatique, ne requérant pas d'action spécifique en dehors du choix des données depuis lesquelles créer les indicateurs. Nous n'avons toutefois pas voulu pousser l'automatisation jusqu'à l'ajout de commentaires automatiques des indicateurs de sortie : la richesse – et la difficulté – d'une approche interdisciplinaire telle que la notre est constituée par la multiplication des analyses et points de vue. Il n'y

18. Voir par exemple l'application « SOFIE » du Commissariat général à l'égalité des territoires (CGET), qui génère automatiquement des commentaires relatifs aux inégalités femmes/hommes dans l'accès à l'emploi. Les commentaires propres aux types d'inégalités majeures de chaque EPCI sont produits de manière automatique depuis les données. <http://outils.observatoire-des-territoires.gouv.fr/sofie/>

avait donc aucun besoin de générer des annotations standardisés et automatiques, forcément moins aboutis que les analyses de chacun des co-concepteurs du modèle. Le rapport produit (figure 5.3) n'intègre donc que les indicateurs, sous forme de tableaux et de graphiques. Ces indicateurs sont organisés par partie, en l'occurrence en fonction du type d'entités et de comportement qu'ils décrivent.

Structurer des rapports pour aller vers la reproductibilité des analyses. On a donc fait le choix de se baser sur des rapports automatisés et minimalistes, ne contenant que les indicateurs dans une forme structurée. Ce choix s'appuie sur des raisons multiples, qui ont toutes en commun une recherche de reproductibilité des résultats et des analyses menées. Une reproductibilité théorique ([encore une ref au positionnement](#)), puisque les résultats de simulation doivent pouvoir être analysés et reproduits par des chercheurs potentiellement intéressés. Mais cette recherche de reproductibilité est aussi pratique, rendue aussi nécessaire par les méthodes de modélisation suivies. *quel sens ?* Tel qu'explicité auparavant (sections 5.1.2 et 5.1.3), celles-ci s'appuient sur de nombreux allers-retours, ce qui requiert une capacité constante à reproduire et à affiner des résultats déjà observés.

La quantité d'expériences requises pour arriver à un état satisfaisant du modèle est tributaire de ces allers-retours, et le nombre de rapports qu'il faut pouvoir produire est important. La fréquence de production de ces rapports est forte, et le modélisateur a alors tout intérêt à en fluidifier et accélérer le processus de création.

Dans une telle situation, la création d'un rapport automatisé garantit une calcul et une production simplifiée et rapide des indicateurs sur les nouvelles données. Cela permet un examen des sorties de simulation presque immédiatement après leur exécution. Cette automatisation permet aussi de mener une seconde évaluation – après le pré-filtrage constitué par l'observation d'indicateurs en direct – du bon déroulement « interne »¹⁹. Le caractère fixe d'un rapport automatisé se base ainsi sur une structure de données contraignante, par exemple constitués en n fichiers dotés de plusieurs colonnes spécifiquement attendues. Les caractéristiques de ces données sont elles-mêmes contraignantes. Un rapport automatisé ne fonctionne, par exemple, qu'en présence d'un nombre pré-défini de réplications complètes. En l'absence d'un de ces critères dans des données en sortie de simulation, le rapport ne peut être généré et émet une erreur. Par exemple, si le nombre de réplications est plus faible qu'attendu, ou encore si tel attribut d'un agent a changé de type informatique, la création du rapport échoue. La présence ou non de cette erreur constitue donc un nouveau filtre de vérification de la validité du modèle. Cela permet, là encore, de détecter des simulations qui présenteraient des comportements incomplets ou aberrants en terme de production de données.

Un autre intérêt majeur des rapports, déjà pointé en avantage des outils de type **CLI** est leur adaptabilité. On a vu ([chap. 3](#)) que les indicateurs à examiner sont

19. Au sens de l'évaluation interne, c'est-à-dire du bon fonctionnement, exempt de bugs, du modèle de simulation implémenté. Voir [ref chap 3](#).

nombreux et surtout, évolutifs, dans le sens où ces indicateurs ont fortement été modifiés, remplacés, affinés, au cours des étapes de paramétrage de SimFeodal. L'utilisation de rapports automatiques permet de minimiser le nombre de modifications à effectuer en cas de changements d'indicateurs. Le programme informatique qui génère les rapports s'appuie ainsi sur un code-source unique, générique aux simulations de chaque modèle. Lors d'un changement d'indicateurs, il suffit alors de modifier ce code-source en une seule place, et tous les appels à ce programme seront alors modifiés en conséquence. À partir de là, pour mettre à jour l'ensemble des rapports déjà produits, c'est-à-dire regroupant les indicateurs de chacune des expériences passées, il suffit de ré-exécuter la routine de production des rapports. (Sans avoir à refaire toutes les simulations)

Dans le cas de SimFeodal, caractérisé par de fréquents changements dans la forme et le calcul des indicateurs, cela a représenté un gain de temps et d'efficacité très conséquent. Par exemple, lors de certaines phases de paramétrage, on pouvait être amenés à faire évoluer le modèle quotidiennement et à tester, à cette même fréquence, plusieurs jeux de paramètres. Il fallait donc analyser les résultats de plusieurs expériences chaque jour, et régulièrement ajouter des indicateurs graphiques afin d'affiner l'évaluation. Ces indicateurs devaient aussi être ajoutés aux expériences des jours précédents, et au final, on re-générait parfois jusqu'à une plus d'une dizaine de rapports sur des cycles temporels courts de quelques jours.

Par extension, cette même démarche d'automatisation, basée sur l'utilisation d'outils de type *CLI*, devrait pouvoir s'appliquer à l'identique, avec les mêmes avantages, dans le cadre plus large de l'évaluation visuelle de modèles (ref chap 3, section 3.1.4).

Dépasser les limites de la compatibilité d'ensemble. La reproductibilité, de manière générale, est plus une démarche qu'un état final : on peut toujours trouver un nouvel élément à « rendre reproductible » dans un travail (cf. chapitre 1, partie sur reproductibilité recherchée). Dans le cas des rapports automatiques, la reproductibilité recherchée doit permettre de reproduire les analyses menées – le calcul et la représentation des indicateurs de sortie – sur les jeux de données issus des différentes versions du modèle.

Comme explicité dans l'**encadré 3.2, chap 3** sur l'incrémentalité des indicateurs, une limite forte empêche d'atteindre une reproductibilité absolue des analyses du comportement des différentes versions de SimFeodal. Les données générées par les différentes versions du modèle ne sont en effet pas systématiquement compatibles. On entend par là qu'elles ne présentent pas toute exactement la même structure, à commencer par les variables enregistrées. Quand bien même il aurait été choisi dès le départ d'enregistrer le plus de sorties possibles, la reproductibilité de l'analyse échoue sur les données produites par le modèle et ses nombreuses versions : le modèle évolue, et avec lui, certaines variables apparaissent et d'autres deviennent caduques. La structure contraignante et précise des données nécessaires à la génération des rapports ne peut être entièrement satisfaite. La prise en compte de l'évolution du modèle demande une adaptation régulière – mais aussi rare que possible – des

programmes qui génèrent ces rapports.

On ne peut donc satisfaire globalement à un objectif de reproductibilité, mais il est toutefois possible de limiter la déviance à cette ambition. Pour cela, on peut agencer les différentes versions du modèles au sein de « générations » de modèle, c'est-à-dire d'ensembles de versions présentant des attributs comparables et générant des données de même structure. Plutôt que d'adapter le code-source des rapports à chaque nouvelle version du modèle, ou encore de ne jamais l'adapter et donc d'être tributaire de la structure des toutes premières versions du modèle, cela constitue un choix intermédiaire qui permet de limiter le nombre de variantes de rapports. Cette approche suit les grandes lignes du développement logiciel général. Les itérations successives d'un logiciel sont constituées de versions majeures – les générations de modèles dans notre cas –, qui n'assurent pas nécessairement de compatibilité avec les versions majeures précédentes, et de versions mineures, dans lesquelles la compatibilité est assurée²⁰.

Pour revenir aux rapports voués à l'évaluation d'un modèle, en inscrivant les différentes versions du modèle – et des programmes générant les rapport correspondant – dans des sous-ensemble de versions, les générations, les différents rapports peuvent être considérés comme reproductibles et automatiques au sein de ces générations. Pour SimFeodal, cela implique d'organiser les différentes versions du modèle – résultant des étapes de paramétrage, cf. chap4 – au sein de grandes générations, à chaque changement structurel des mécanismes ou données produites par le modèle (voir chapitre 4, tableau des versions et sous-versions).

Les rapports, des instruments suffisants ? A l'issue de la conception et de l'implémentation de ces rapports automatiques, on dispose donc, pour chaque expérience, d'un document aisément partageable et lisible. Ces documents s'enrichissent, au fur et à mesure des générations de modèles, de nouveaux indicateurs, et sont comparables au sein de ces générations. Cela pourrait constituer la dernière étape de la création d'outils d'évaluation d'un modèle, dans la limite d'un nombre de versions ou de génération de modèles assez restreint.

Qui a écrit
ces rapports?
de leur analyse?

SimFeodal, comme c'est souvent le cas dans les modèles à base d'agent, a toutefois été caractérisé par une forte quantité d'allers-retours entre le modèle et ses résultats, entraînant à chaque fois de nouvelles expérimentations (cf. section 5.1).

On a vu que la manipulation d'un grand nombre d'indicateurs, même pour une quantité restreinte d'expériences, disqualifiait l'usage de fichiers individuels et poussait à l'usage de rapports structurés. Avec un grand nombre d'expériences, les mêmes limites apparaissent pour les rapports : la masse d'expériences rend partiellement caduque l'utilisation unique des rapports automatiques. Il est en

20. Par exemple, un fichier de dessin vectoriel créé avec le logiciel Adobe Illustrator 15.0 ne sera pas lu correctement avec une version 14.0. Ce fichier présentera toutefois un compatibilité parfaite avec les versions 15.1 à 15.n du logiciel.

effet aisément de comparer, sur un même écran d'ordinateur, deux ou trois rapports, mais dès lors qu'il faut en comparer un plus grand nombre, la manipulation conjointe des rapports devient complexe, tout autant que d'avoir une vision globale des résultats principaux de chaque expérience.

5.2.4 Organiser les rapports : les *dashboards*

Pour être en mesure de comparer de nombreux éléments, il est nécessaire de passer d'une exploration linéaire, fondée sur le visualisation successive de chacun des indicateurs, à une exploration globale et interactive. En pratique, plutôt que de faire défiler visuellement les nombreuses pages d'indicateurs, mieux vaut une interface présentant les points clefs de l'évaluation et qui permette d'entrer dans le détail de chacun des indicateurs dans un second temps, sur demande. Comme le résume le « mantra » de l'analyse visuelle (« *Visual information-seeking mantra* ») de Ben SHNEIDERMAN :

« Overview first, zoom and filter, then details on demand »

SHNEIDERMAN 1996, p. 2

outre
de
Recherche
de
remplir
entre
etats)
Chercher?

5.2.4.1 Les *dashboards*

Cette logique, assez universelle désormais, est celle qui préside à la création des nombreux « tableaux de bord », ou « *dashboards* » que l'on voit émerger depuis la fin des années 1990. Rob Kitchin et ses co-auteurs définissent ainsi les *dashboards*, en s'appuyant sur les travaux de FEW notamment :

« For Few [(FEW 2006a, p.34)] a 'dashboard is a visual display of the most important information needed to achieve one or more objectives; consolidated and arranged on a single screen so the information can be monitored at a glance'. Just as a car dashboard provides critical information needed to operate the vehicle at a glance, indicator dashboards provide key information for running companies or cities (Dybriwny & Rivard, 2004 [RIVARD et COGSWELL 2004]). »

KITCHIN, LAURIAULT et MCARDLE 2015, p. 11

Très répandus dans le monde de l'informatique décisionnelle (*Business Intelligence, BI*), ces outils permettent d'explorer des données d'entreprises, par exemple des résultats financiers. Pour ce faire, ils mettent en avant, dans une interface unique, des indicateurs clés (*Key Performance Indicators, KPI*), qu'il est ensuite possible de filtrer et d'affiner, par exemple par sélection de différents intervalles temporels.

Les *KPI* jouent le rôle d'indicateurs synthétiques, c'est-à-dire qu'ils s'adressent à des gestionnaires, par exemple des *managers*, qui ont une expertise importante sur les résultats produits. Les utilisateurs des *dashboards* ne sont donc pas des analystes, à même d'explorer eux-mêmes les données mobilisées, mais plutôt des thématiciens qui se fondent sur les indicateurs présentés pour prendre des décisions.

La dichotomie « analyste/décisionnaire » s'exprime aussi dans le domaine de la recherche, et notamment dans la recherche en géographie urbaine à visée applicative. Avec l'avènement des données massives et de leur prise en compte pour la gestion des villes (*smart cities*), les géographes se sont aussi penchés sur des outils de ce type (LAURINI 2018). En résulte une utilisation de plus en plus fréquente de *dashboards* en géographie urbaine (« *city-dashboards* », ROUMPANI, O'BRIEN et HUDSON-SMITH 2013 ; KITCHIN, LAURIAULT et MCARDLE 2015 ; BATTY 2015).

Le parallèle avec le monde de l'informatique décisionnelle est en effet présent dans les types d'utilisateurs et de producteurs de ces outils. Il s'agit de mettre à disposition d'experts thématiques (les décideurs publics) des indicateurs clés, issus de calculs parfois complexes. Cela afin de leur permettre d'évaluer une situation donnée et de prendre les décisions politiques adéquates.

Le constat ayant mené à l'apparition des premiers *dashboards*, tant en informatique décisionnelle qu'en géographie urbaine, est identique. Les informations nécessaires à l'évaluation d'une situation (financière, relative aux politiques publiques~~et tc.~~) sont de plus en plus nombreuses et hétérogènes. Les indicateurs permettant de mener ces évaluations, pensés pour les décideurs qui en feront usage (*managers*, acteurs publics~~et tc.~~), se démultiplient et se diversifient aussi par conséquence.

Inspiré autant par l'usage *BI* que par l'usage géographique, nous considérons que ces outils peuvent se révéler utiles dans l'évaluation de modèles de simulations complexes. Les enjeux sont en effet les mêmes : permettre à des thématiciens de comprendre et d'évaluer les sorties d'un modèle, à l'aide d'indicateurs nombreux et complexes présentés de manière transparente relativement à cette complexité.

Ce positionnement méthodologique s'inscrit pleinement dans la démarche de co-construction interdisciplinaire de SimFeodal. On y retrouve ainsi la même logique qui anime les dashboards : une évaluation menée par des thématiciens qui s'appuient pour cela sur des indicateurs clefs (ref. aux indicateurs les plus importants dans le chap 3) et précisent leur analyse à l'aide d'indicateurs secondaires présentés sous forme d'un panel varié de visualisations. Nous avons donc choisi de ré-organiser les rapports initialement produits pour leur donner une forme plus adaptée à ces enjeux, sous forme de *dashboards*.

5.2.4.2 SimVADB

Les *dashboards* font souvent usages de représentations graphiques très métaphoriques des tableaux de bord automobiles. On y retrouve fréquemment une forte mise en valeur d'indicateurs numériques simples au travers de représentations ~~skeuomorphes~~, c'est-à-dire qui reprennent l'apparence physique des objets symbolisés²¹. On retrouve communément, par exemple, des indicateurs représentés sous forme de jauge (*gauge charts*), de thermomètres (*thermometer charts*), ou encore de voyants d'alerte et autres témoins lumineux (figure 5.4)).

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

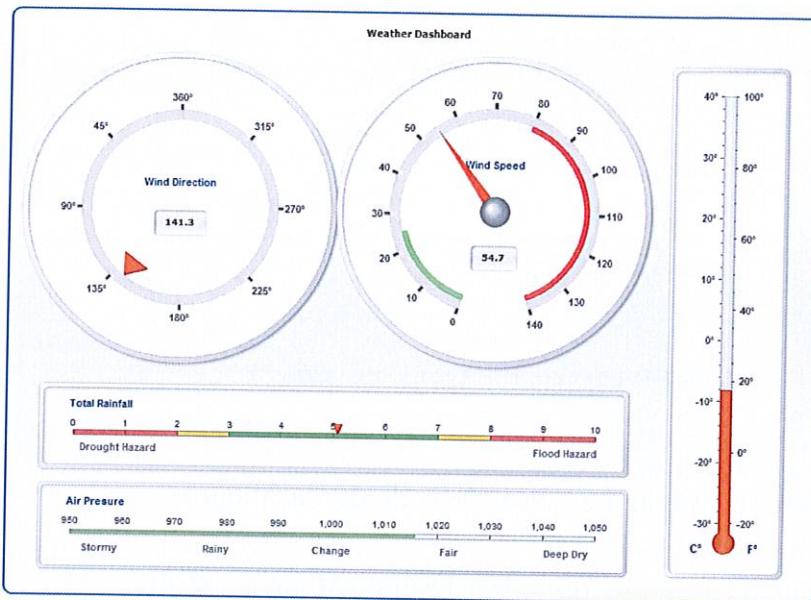


FIGURE 5.4 – Un exemple de représentations visuelles courantes dans les *dashboards*. Tiré de PANDRE (2011)

Pour SimFeodal, les indicateurs étant assez fortement conçus et structurés ([chap. 3](#)), nous n'avons pas ressenti le besoin de faire appel à ce type de représentation. Nous avons donc emprunté aux *dashboards* la logique d'organisation visuelle des indicateurs plutôt que les modes de visualisation en eux-mêmes. Pour faciliter la transition pour l'utilisateur, on cherchait ainsi à produire un *dashboard* au plus proche, visuellement, des rapports automatiques qui les précédait.

On a pour cela développé un *dashboard* adapté à SimFeodal, nommé SimVADB²². Dans un premier temps, on souhaitait simplement ré-organiser le code-source produisant les rapports automatiques, afin de convertir ces rapports en *dashboards*. Cela a été effectué au moyen d'outils permettant de générer des applications en ligne, sans changer de langage de programmation. Dans ce cas, on s'est appuyé sur la librairie logicielle Flexdashboard (IANNONE, ALLAIRE et BORGES 2018).

Le passage du rapport automatique au *dashboard* illustre l'un des grands intérêts des outils de type *CLI* : dans le cas de SimVADB, il a suffi de ré-organiser le code, sans modifier à aucun moment les fonctions de calcul et de création des indicateurs de sortie de simulation. Les codes 5.1 et 5.2 illustrent la facilité de cette modification. Il s'agit véritablement de placer les différentes fonctions dans des blocs graphiques. Ces modifications minimes augmentent toutefois considérablement la convivialité et la facilité de l'analyse de résultats de sortie d'un modèle.

22. Simulation Visual Analysis DashBoard.

Cette application a rapidement été remplacée par l'itération suivante (SimEDB, voir section 5.2.5), et n'a donc dans les faits jamais été complètement finalisée. On en trouve une trace, fonctionnelle mais incomplète (les versions ultérieures n'ont pas été enregistrées dans l'outil de versionnement), dans ce dépôt logiciel : <https://github.com/RCura/SimEDB/tree/2cd22c7c>

```
# Agent de type A
afficher('Agent de type A')

print('Indicateur 1')
calcul_indicateur_1 {...}
affichage_indicateur_1 {...}

afficher('Indicateur 2')
calcul_indicateur_2 {...}
affichage_indicateur_2 {...}

# Agent de type B
afficher('Agent de type B')
[...]
```

```
onglet{titre = 'Agent de type A',
sous_onglet{titre = 'Indicateur 1',
calcul_indicateur_1 {...}
affichage_indicateur_1 {...}
},
sous_onglet{titre = 'Indicateur 2',
calcul_indicateur_2 {...}
affichage_indicateur_2 {...}
}
},
onglet{titre = 'Agent de type B',
[...]
}
```

Code 5.1 – Pseudo-code du rapport automatique.

Code 5.2 – Pseudo-code du dashboard.

Comme dans l'exemple de code, on a préféré organiser les indicateurs au seins d'onglets plutôt que de les présenter dans des pages successives. Les onglets de premier niveau représentaient les types d'agent, et des onglets de second niveau permettaient de visualiser l'ensemble des indicateurs associés à ces agents (figure 5.5).

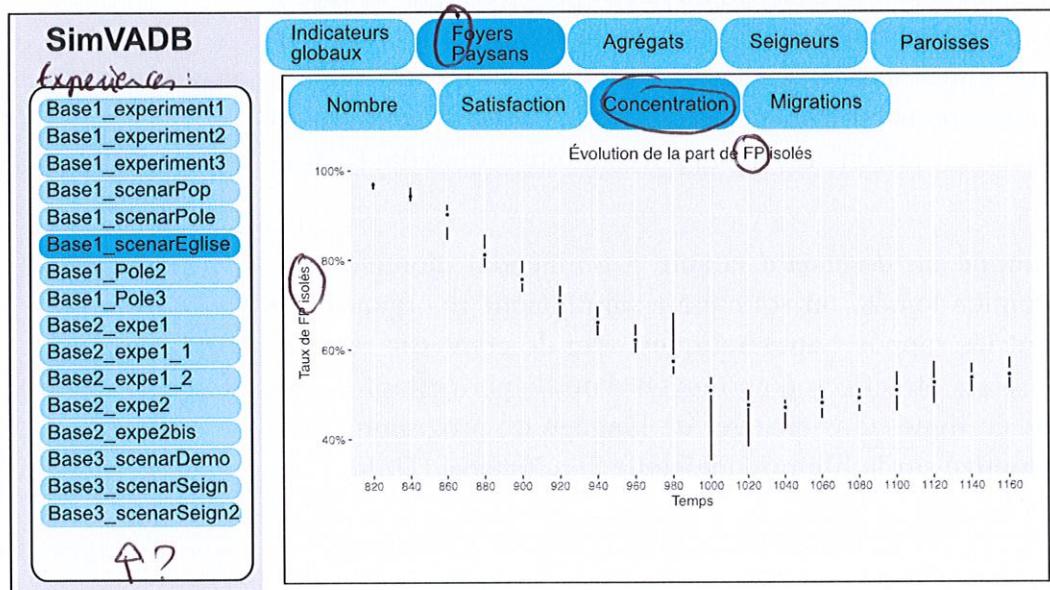


FIGURE 5.5 – Un *mock-up*²³ de la première interface de SimVADB, un *dashboard* dédié à la visualisation des indicateurs de sorties de simulation de SimFeodal.

Au niveau de l'interface utilisateur, SimVADB permettait de choisir, via un menu de sélection (partie de gauche dans la figure 5.5), les expériences passées dont on voulait visualiser les indicateurs de sortie (les deux niveaux d'onglets de la partie de droite).

Les limites du dashboard. Avec la multiplication des valeurs de paramètres testées, il est devenu plus efficace de regrouper les expériences au sein d'expérimentations. Celles-ci voient varier plusieurs paramètres, potentiellement avec de multiples valeurs de paramètres pour chacun. Elles constituent

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

donc un ensemble d'expériences qui partagent des mécanismes et un jeu de paramètre par défaut communs.

Une interaction trop simple. Avec le mode de sélection choisi dans SimVADB, basé sur le nom des expériences, il devenait plus difficile de sélectionner rapidement des ensembles d'expériences membres d'une même phase d'expérimentation (cf. **tableau versions et sous-version, chap 4**). En effet, et comme illustré dans la figure 5.5, les noms d'expériences tendent à s'allonger, et avec leur masse augmentant, il est peu commode d'avoir à parcourir tout un long menu de sélection pour trouver les expériences souhaitées. De plus, malgré des tentatives de nommage régulières et explicites, la multiplication des expériences et expérimentations implique aussi une certaine confusion dans les types de mécanismes et valeurs de paramètres associés. Sans table de correspondance complète entre les noms des expériences et leurs valeurs de paramètres, il devenait impraticable de retrouver les différentes expériences mettant en avant, par exemple, des attractivités fortes par les pôles, une plus forte hiérarchisation des attracteurs ou encore des migrations lointaines facilitées. Le choix méthodologique d'interaction avec la plate-forme d'affichage des indicateurs, basé sur une sélection des expériences depuis leur nom, s'est donc révélé inadapté à la sélection et à l'exploration des sorties de SimFeodal.

YB

Dépasser le « présentoir » de données. Au delà du souci du mode d'interaction, qui aurait pu être amélioré, un autre problème apparaissait. Pour évaluer visuellement différentes configurations du modèle, on ne pouvait se contenter d'un simple affichage des données, au sein d'un outil de type présentoir interactif tel que SimVADB. Comme dit dans **le chapitre 4**, le paramétrage de SimFeodal a ainsi reposé sur de nombreuses étapes d'évaluation des différentes version du modèle. L'approche d'analyse principale était donc la comparaison, point par point, entre les résultats des indicateurs de sortie de simulation des versions successives de SimFeodal. Un outil de présentation dynamique de résultats de sorties de simulations est certes plus adapté qu'un rapport statique, mais il ne constitue pas pour autant un outil adapté à la comparaison. S'il suffit pour de la restitution, par exemple dans le cadre du rapport systématique des résultats de SimFeodal, on ne peut s'appuyer uniquement sur une succession d'évaluations visuelles pour appréhender l'étendue des changements apportées par une modification des valeurs de paramètres.

5.2.5 Interagir avec les rapports : exploration interactive

Face à la démultiplication des expérimentations, consécutive aux nombreuses étapes de paramétrage de SimFeodal (cf. **chap 4**), il a fallu repenser la plate-forme d'évaluation des résultats. Pour cela, considérant que les simulations ne pouvaient être aisément appréhendées et sélectionnées par leur nom, numéro d'étape ou de version, il a été décidé d'adopter une posture plus proche de l'exploration du modèle en elle-même. C'est-à-dire de ne pas caractériser les simulations par un identifiant quelconque, mais plutôt par leur spécificité in-

Et qui peut les retenir ?
Oui !

la signature de chaque expérience.

trinsèque, c'est-à-dire la combinaison de valeurs de paramètres qui les rendent uniques. Ce faisant, au sein de la plate-forme d'exploration SimVADB, l'enjeu devenait plutôt la compréhension des effets des valeurs de paramètres sur les indicateurs que l'évaluation d'une simulation en particulier. Il fallait passer du descriptif, quelle qu'en soit la méthode, à du comparatif.

Du point de vue de l'interface utilisateur, cela implique que la sélection ne se fasse plus par un unique critère (le nom de la simulation), mais au contraire sur du multi-critère. Par une succession de sélections, chaque paramètre pouvait constituer un nouveau filtre dans lequel on avait à choisir les valeurs à interroger (voir la figure 5.6 (E) de l'encadré 5.1).

La quantité de paramètres en entrée était importante et pouvait dès lors donner lieu à un mode de sélection complexe et fastidieux – définir une par une les valeurs voulues pour chacun des 45 paramètres –. Nous avons choisi encore une fois de nous appuyer sur l'aspect visuel afin de permettre aux utilisateurs de SimVADB de choisir la ou les expérimentations à analyser.

Visualiser avec des coordonnées parallèles. Pour cela, on a choisi de représenter les combinaisons de paramètres dans un graphique en « coordonnées parallèles » (*parallel coordinates*, d'après INSELBERG et DIMSDALE 1987, voir FEW 2006b par exemple pour une description plus succincte, illustrée et pratique). Ce type de graphique est en effet extrêmement pertinent pour représenter une information multi-dimensionnelle en ce qu'il permet de détecter graphiquement des *clusters* d'individus statistiques²⁴ (HEINRICH et WEISKOPF 2013, p. 2), c'est-à-dire de faire ressortir visuellement les expériences dont les valeurs de paramètre sont proches. Notons bien que l'on parle ici des valeurs de paramètres, c'est-à-dire des conditions des expériences, et non des indicateurs de sortie. L'approche va ainsi des paramètres aux résultats : depuis des valeurs de paramètres choisies, on analyse la diversité des résultats.

Ainsi, bref
de mettre un
exemple de
graphique Ici.

Interagir avec des coordonnées parallèles. De plus, en matière d'interaction, on utilise fréquemment les graphiques en coordonnées parallèles en vue de filtrage. Cette opération est le plus souvent menée par des actions de *brushing* (« brossage »), c'est-à-dire de sélection graphique d'une zone en dessinant son étendue à la souris (voir encadré 5.1). Ce type de sélection se révèle en effet souvent plus efficace et intuitive qu'une sélection textuelle plus systématique :

« Filtering is an operation that removes signals from its input. A filter reduces the number of lines to be rendered. In this sense, dynamic querying [...] is a filter, if implemented with brushing [...], which reduces clutter by putting the filtered lines in focus using

24. Ici, chaque expérience est un individu statistique. Il est caractérisé par un ensemble de variables, les différents paramètres, et les modalités de ces variables que cet individu emprunte (les valeurs de paramètres). Quand le nombre d'individus est important, les différentes « courbes », qui correspondent au profil des individus sur le graphique en coordonnées parallèles, peuvent se superposer et montrer des tendances similaires. Avec ce type de représentation, il est facile de visualiser les grandes classes d'individus constituées par ces « tendances », et donc de constater des distinctions entre les individus (les expériences) de manière visuelle.

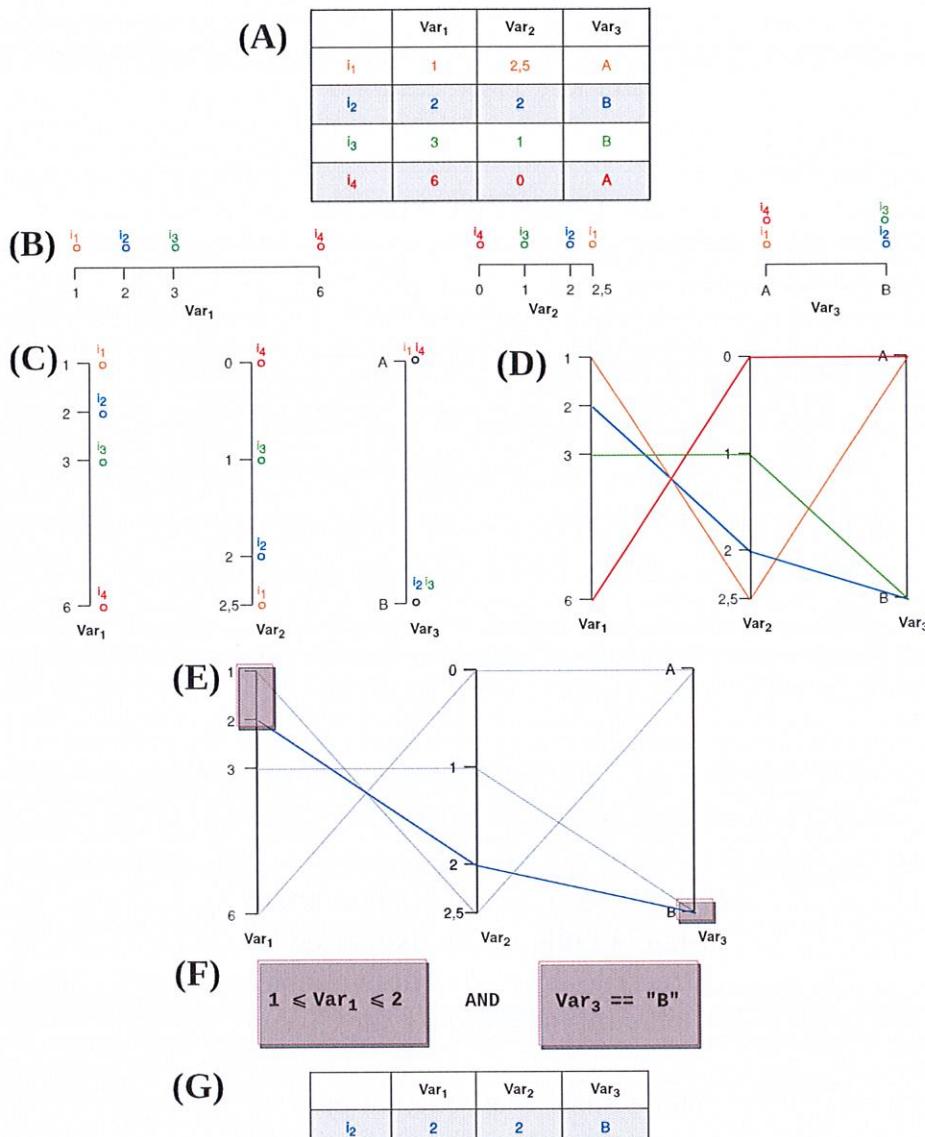


FIGURE 5.6 – Construction d'un graphique en coordonnées parallèles et sélection interactive.

Appliqué aux données de SimFeodal, cette interface (figure 5.7) se révèle particulièrement efficace pour sélectionner les configurations de paramètres à explorer. Ainsi, en « brossant » quelques filtres manuellement (figure 5.7 - A), on arrive rapidement à isoler une expérience spécifique.

*surtout si/ql on a bien ordonné
les variables (:)
(trouver par exemple
l'ordre qui minimise
les interférences)*

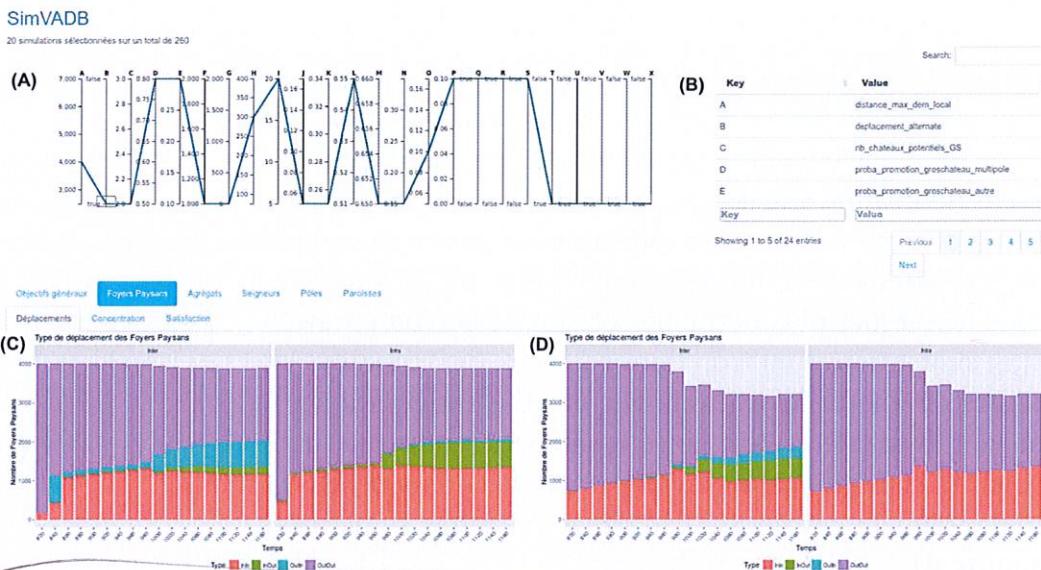


FIGURE 5.7 – SimVADB (Simulation Visual Analysis DashBoard), un *dashboard* d’exploration visuelle des indicateurs de sortie de simulation de SimFeodal. La sélection des simulations à explorer se fait dans le graphique en coordonnées parallèles (A), en « brossant » des filtres graphiques sur les « dimensions » du graphique, dimensions dont les intitulés sont explicités dans le tableau B. Les graphiques C et D indiquent l’évolution des types de déplacements des foyers paysans au cours des simulations.

- Le graphique C représente, pour cet indicateur, une moyenne de l’ensemble des simulations intégrées dans la base de données (260 ici), recouvrant donc plusieurs valeurs de paramètres.
- Le graphique D représente cet indicateur calculé depuis un sous-ensemble de 20 simulations (donc une expérience composée de 20 réplications), pour lesquelles le paramètre « B » (deplacement_alternate) vaut true.

→ Change
Sait la police
Sait la famille
pour les
legende
C'est plus
utile

Afin de permettre aux utilisateurs de remarquer les particularités des simulations explorées, nous avons choisi de mettre en emphase les différences entre la tendance générale des indicateurs, en calculant des moyennes de l’ensemble des simulations (figure 5.7 - C), et les valeurs spécifiques des indicateurs de l’expérience choisie (figure 5.7 - D). Cela permet, visuellement, d’être en mesure d’évaluer les sorties de simulation d’une expérience tout en ayant un référentiel visible. Les différentes expériences produisent des résultats sensiblement similaires²⁵, et on ne peut alors plus les comprendre sans les confronter à d’autres résultats similaires. Le choix d’une agrégation de l’ensemble des simulations effectuées est discutable, en ce qu’on aurait par exemple pu plutôt isoler des simulations « de référence » afin de diminuer l’effet « d’aplatissement » engendré par l’agrégation de résultats nombreux et hétérogènes. Toutefois, la variabilité des résultats étant encore assez restreinte, au moment de la création et de l’utilisation de SimVADB, ce référentiel agrégé permettait déjà une compréhension plus fine des sorties de simulations, en particulier dans l’analyse de l’impact de variations fines de valeurs de paramètres.

25. Si chaque expérience, et chaque réplication, produisent des résultats uniques, le choix d’une évaluation par des indicateurs visuels peut prêter à confusion si l’on n’a pas de repère précis. Les critères attendus, présentés dans **le chapitre 3** sont ainsi assez précis pour départager une simulation très éloignée des attentes et une autre simulation plus conforme. Pour autant, par exemple quand les valeurs de paramètres varient faiblement, les résultats produits peuvent être assez similaires dans les grandes tendances qu’ils font ressortir.

5.2.6 Explorer en comparant : la plateforme SimEDB²⁶

Après un travail de paramétrage grossier qui permet de stabiliser les mécanismes, il est souvent nécessaire de passer à une phase plus fine. On vise à ce moment à mieux calibrer un modèle à l'aide de variations de valeurs de paramètres de granularité inférieures. En vue d'évaluer les simulations, et donc de les différencier les unes des autres à l'aune des indicateurs générés, la comparaison d'une expérience spécifique avec un référentiel constitué de toutes les expériences précédentes ne permet plus de mener ce travail de comparaison fine. Les variations entre simulations sont trop fines pour être distinguables les unes des autres par le biais d'une comparaison avec un référentiel unique²⁷. Cela s'entend quelque soit la manière dont ce référentiel est constitué, qu'il résulte d'une agrégation de simulations ou encore d'une version « de base » du modèle (par exemple, dans le cas de SimFeodal, les versions principales identifiées dans le chapitre 4).

Analyse
Multiéchelle

Pour pouvoir correctement évaluer les apports d'un nouveau jeu de valeurs de paramètres, et donc, dans une démarche itérative, pouvoir différencier deux expériences successives, il est nécessaire d'être en mesure de comparer directement les expériences les unes avec les autres, ou encore avec un référentiel facilement ajustable. On peut énumérer les quelques exemples de cas de figure suivants :

- Comparaison entre une expérience spécifique et une autre expérience spécifique de même « importance ». Par exemple, comparer deux expériences qui font varier légèrement différemment une valeur de paramètre.
- Comparaison entre une expérience spécifique et une autre expérience spécifique d'« importance » différente. Cette différence de niveau peut être constituée par exemple par une version « de base » que l'on comparerait à une variante de celle-ci.
- Comparaison entre deux expérimentations, par l'agrégation de leurs résultats. Si l'on a mené des expérimentations faisant varier de manière systématique deux paramètres différents, il peut être intéressant de les comparer en bloc, c'est-à-dire par exemple en prenant les moyennes de chacune des expériences composant ces expérimentations.

Ce faisant, on fait en fait varier la notion de « simulation de référence », qui peut alors revêtir plusieurs formes. Pour cela, il n'est plus possible de mener

26. La plate-forme d'exploration SimVADB (SimFeodal Visual Analysis Dashboard) a été renommée SimEDB ([...] Exploration Dashboard) par soucis de simplicité, le terme « Exploration » nous semblant plus compréhensible et explicite que celui de Visual Analysis. Ce nom apporte de plus une cohérence sémantique entre plusieurs productions de l'auteur – TimeLineEDB - (CURA 2017b); RoadTrafficEDB et CitiBikeEDB - (CURA 2017a). Cela inscrit cette plate-forme d'exploration de données issues de simulation dans une « famille » d'outils d'exploration de données spatio-temporelles.

27. On peut prendre l'exemple de SimFeodal. En faisant varier le nombre de foyers paysans de 4000 à 4200 (5% de variation), les résultats du modèle changent peu : de faibles variations de valeurs de paramètres entraînent le plus souvent de faibles variations dans les indicateurs de sorties observés. On peut de plus noter que les répercussions d'un changement de valeur de paramètre peuvent être très différentes de l'ordre de grandeur de ce changement de valeur. Cela s'explique par la non-linéarité de l'influence des paramètres. Dans l'exemple pris, pour ces 5% de variation dans le nombre de foyers paysans, la majorité des indicateurs variera ainsi de moins de 1%.

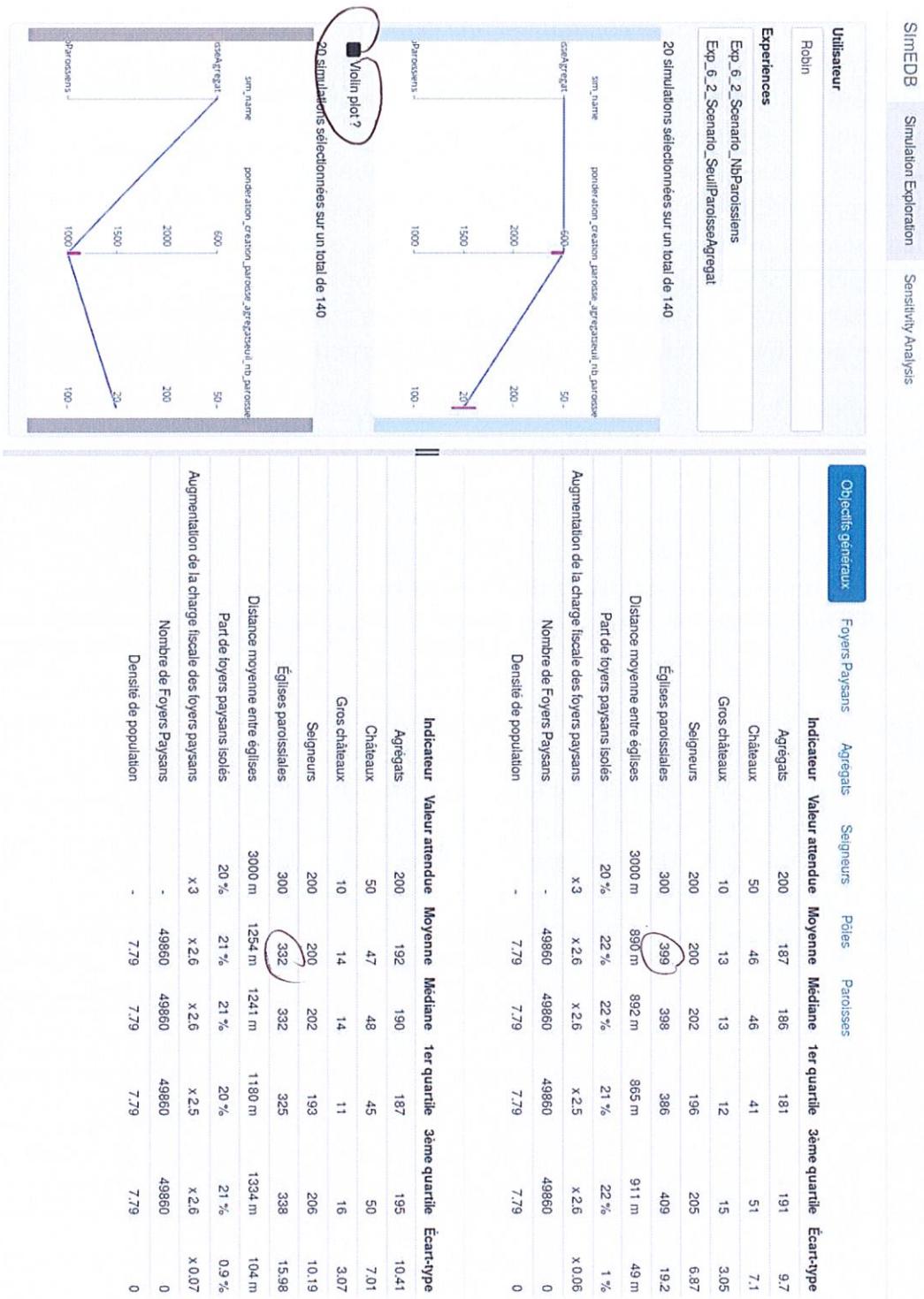


FIGURE 5.8 – SimEDB

As tu fait tester les interfaces pour avoir un retour client ?

Nous reviendrons plus précisément et longuement sur la description de SimEDB dans les parties suivantes (section 5.4, p. 57), mais après en avoir décrit les étapes de construction et les besoins auxquelles ces évolutions répondent, il est maintenant nécessaire de revenir sur les données manipulées par cette plate-forme d'exploration. Le type, la structure et la masse de ces données (section 5.1) sont en effet indissociables des choix méthodologiques effectués pour SimEDB. Il est donc important de présenter les choix et contraintes de ces données avant d'entrer dans une description approfondie de la plate-forme.

5.3 Organiser les données

On a vu dans la première partie de ce chapitre (section 5.1) que les données produites par SimFeodal étaient nombreuses, diverses et massives. La seconde partie (section 5.2) a montré les types de problèmes que de telles données, une fois exploitées pour en tirer les indicateurs de sortie, peuvent poser en matière d'exploration.

Nous souhaitons ici revenir sur un corollaire indispensable à l'utilisation efficace de ces données. De la même manière que la multiplicité des indicateurs, des expériences et des expérimentations requiert des outils d'exploration adaptés, la multiplicité des données requiert des outils de stockage et d'interrogation eux aussi adaptés. Là encore, on peut noter une succession de contraintes liées à ces données et à leur massification, contraintes qui limitent et guident les modes d'organisation de ces données. Sans structuration adéquate, l'acquisition, l'archivage, l'interrogation ou encore la sauvegarde des données générées par le modèle ne peuvent être garantis, et encore moins de manière efficace. Le choix d'une méthode d'organisation des données en sortie de simulations ne relève donc pas d'une quelconque coquetterie technique. Au contraire, conditionne et constraint fortement aussi bien les modalités de création des indicateurs que les possibilités de la plate-forme d'exploration de les afficher de manière interactive.

40 Ah

5.3.1 Assurer la capacité d'interrogation des données

Avant de se soucier du « schéma » de la base de données³⁰, du choix du Système de Gestion de Base de Données (SGBD), ou encore des performances de ce dernier, il convient de se fixer sur la manière dont on souhaite entreposer les données.

De la myriade de fichiers issus de tableurs organisés dans une multitude de dossiers spécifiques à l'entrepôt de données décentralisé orienté documents, en passant par les traditionnelles bases de données relationnelles, les possibilités de stockage et d'organisation des données issues de simulations sont ainsi innombrables. Plusieurs contraintes successives permettent de limiter le choix à un sous-ensemble de solution adaptées parmi lesquelles on peut alors mener une étude plus approfondie, passant notamment par des comparaisons entre ces candidats.

Une des premières contraintes est constituée par la nécessité d'interroger fréquemment et de manière répétée les données. C'est l'une des contre-parties du passage d'un rapport automatique à un outil d'exploration interactif et dynamique (section 5.2.4). Dans un rapport automatique, on interroge une fois les données pour en tirer les indicateurs de sortie, et ceux-ci ne sont plus amenés à changer, sauf re-calculation par exemple suite à des ajouts d'indicateurs. Au

30. On utilise souvent le terme de « schéma » pour désigner la version implémentée, dans un SGBD spécifique, du Modèle Conceptuel de Données (MCD). Contrairement au MCD, qui donne une version conceptuelle et générique d'une base de données, le schéma est donc tributaire du SGBD dans lequel il est intégré.

contraire, dans un outil dynamique et interactif, les indicateurs sont calculés depuis les données « à la volée », c'est-à-dire à chaque qu'un indicateur doit être affiché. On peut mettre en place un système de cache, pour conserver les calculs déjà effectués, mais avec les dernières itérations de SimEDB où le nombre de possibilités de sélections est extrêmement important, ce n'est plus possible. Il est nécessaire de procéder aux calculs à chaque affichage des graphiques et tableaux de résultats. L'interrogation des données est donc extrêmement fréquente et répétitive. Elle doit alors être aussi simple (en termes de mode d'interrogation) qu'efficace (en termes de rapidité d'interrogation).

Dans le cadre des données issues de SimFeodal, en vue de leur mobilisation dans SimEDB, nous avons ainsi eu à sélectionner quelques SGBD candidats parmi une foule de solution possibles. Afin de guider ce choix, trois critères ont été définies, et forment, selon une hiérarchie propre à leur ordre, un ensemble de filtre ayant permis la réduction des SGBD possibles à un nombre appréhendable. Ces critères, dont l'énonciation guidera cette partie, sont ainsi (1) l'universalité, ou « agnosticité », des SGBD aux outils de requête; (2) la pérennité et stabilité des solutions disponibles et (3) les performances des SGBD considérés.

5.3.1.1 Interroger de manière universelle et indépendante

Lors de la conception d'un outil faisant appel à des données, qui plus est massives, il convient de se positionner tôt sur la manière d'interroger ces données. Par interrogation, on entend ici, comme souvent dans le domaine des bases de données, la manière de faire appel, concrètement, aux données, pour en tirer les sous-ensembles, agrégations et autres résultats synthétiques résultant du traitement des données brutes. Si l'on considère des données stockées dans un tableur, alors les « formules », les tableaux croisés dynamiques ou encore les graphiques issus du tableur sont des interrogations des données, qui s'expriment dans ce cas via un ensemble de langages, écrits – les formules, qui font appel à des fonctions spécifiques des tableurs – ou visuels – les tableaux croisés dynamiques, construits en faisant glisser des intitulés de colonnes dans un tableau.

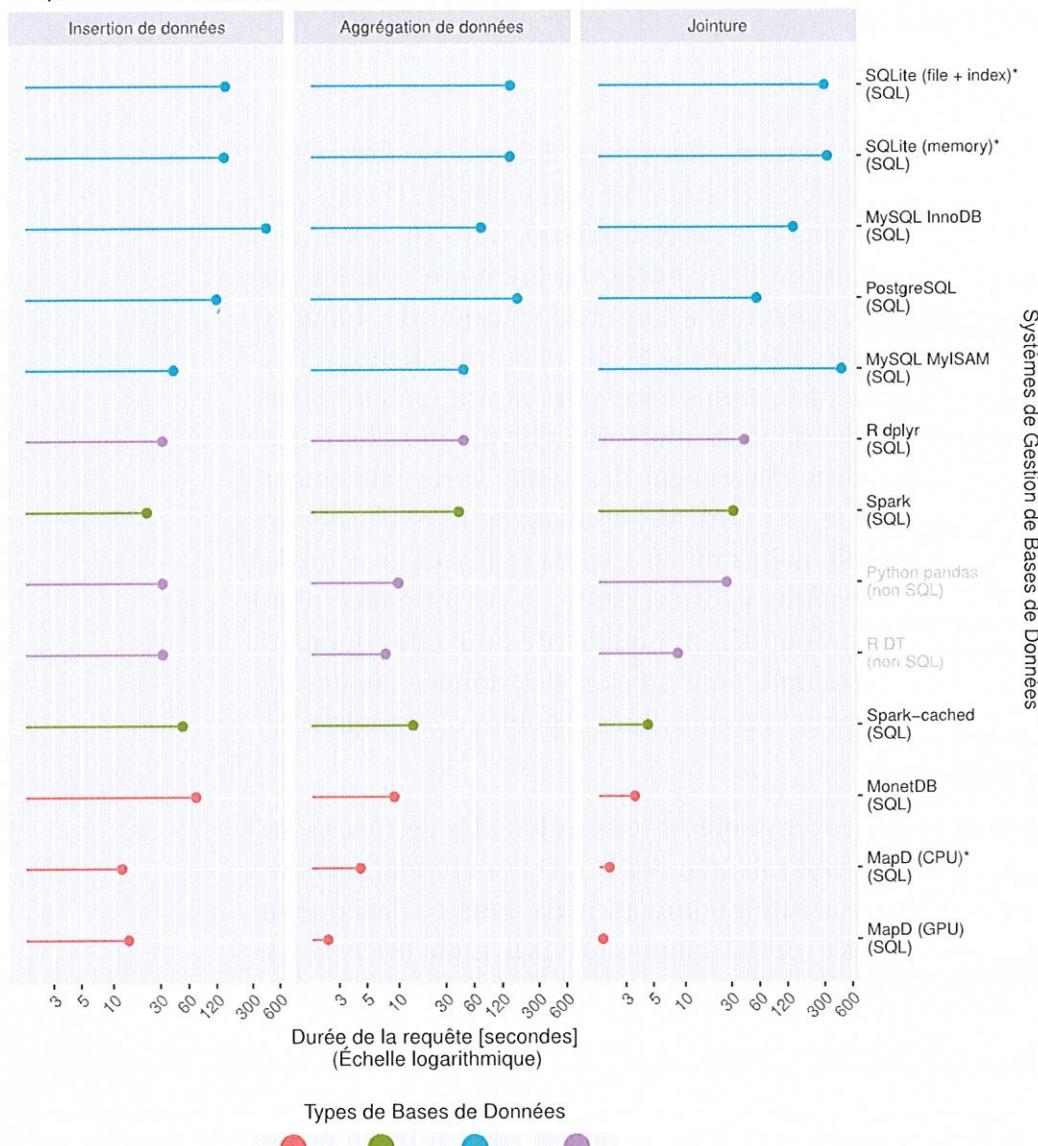
T
pas fin
(je n'ai pas
d'autre sur
celle perte)

Stockage distribué ou centralisé. Avant même de s'intéresser aux spécificités de ces langages, un premier choix réside dans le mode de stockage des données qui doivent être mis à disposition d'une plate-forme. Doit-on laisser l'utilisateur intégrer lui-même les données, et ainsi, en faire un stockage « distribué », dans le sens où chaque utilisateur de l'application possèderait physiquement une copie locale des données ? Ou, au contraire, les données doivent-elles être centralisées, c'est-à-dire enregistrées en une seule copie à laquelle les utilisateurs accèderaient à distance ? Pour reprendre l'exemple des tableurs, doit-on privilégier une solution locale – chacun ayant une copie du fichier tableur et menant ses propres modifications dessus – ou une approche de type centralisée, par exemple en privilégiant des tableurs collaboratifs en ligne (*Google Docs/Sheets* par exemple) ?

Habituellement, c'est-à-dire dans une grande majorité d'applications, les don-

Performances comparées de SGBD

Temps nécessaires à l'exécution de requêtes



* R. Cura (2018), d'après S. Pafka (2017)
 MapD (CPU) et SQLite : Benchmark mené sur un système moins puissant que les autres

FIGURE 5.9 – Comparaison de la performance de différents SGBD sur un jeu de données test de 100 millions de lignes. Résultats tirés de PAFKA (2017) et complétés par l'auteur.

Les « types de Bases de Données » correspondent aux usages les plus fréquents des SGBD comparés :

- Analytiques : SGBD optimisés pour les traitements de type agrégation, via une architecture orientée colonne plutôt qu'orientée ligne comme dans les SGBD Relationnels. Ils sont optimisés pour la rapidité d'exécution.
- Massives : SGBD pensés pour la gestion et l'interrogation de données massives (big data), permettant notamment une parallélisation des requêtes. Ils sont optimisés pour la capacité à gérer des volumes gigantesques de données.
- Statistiques : SGBD internes aux environnements de traitement de données statistiques, reposant sur une gestion en mémoire vive. Souvent intégrés d'office dans les environnements décrits (R, Python), ce sont les SGBD les plus simples à mettre en place et à manipuler.

Au regard des performances de chacun des SGBD, MapD (ROOT et MOSTAK 2016) présente l'avantage indéniable de la vitesse de traitement des requêtes, tout en étant compatible avec les standards de l'interrogation de données (langage de requête SQL, interfaçable via JDBC). Même exécuté sur un infrastructure informatique n'est pas optimisée pour cette solution⁴³, MapD est incontestablement plus performant que les autres SGBD.

On notera toutefois que le SGBD MonetDB (VERMEIJ et al. 2008), dans son implémentation intégrée MonetDBLite (RAASVELDT et MÜHLEISEN 2018), affiche aussi des performances très compétitives, et aurait pu être choisi pour SimEDB, présentant notamment l'avantage d'être plus utilisé et ancien⁴⁴. Un des ouvrages de référence en *visual analytics* s'interrogeait d'ailleurs sur les nouvelles possibilités et l'adéquation offertes par ce SGBD (FEKETE 2010, p. 105 in KEIM et al. 2010).

Nous avons au final préféré MapD, en particulier parce que les données issues de SimFeodal sont amenées à augmenter, renforçant donc petit à petit l'écart de performance entre MapD et MonetDB. Par ailleurs, par une heureuse coïncidence, MapD a été placé sous licence libre peu avant que nous n'ayons à nous pencher réellement sur les problèmes de performances et de robustesse qui apparaissaient suite à l'augmentation du nombre de simulations effectuées.

5.3.2 Structuration des données de SimFeodal

Le choix d'un SGBD est une étape indispensable à la mise en place d'une base de données, mais il ne concerne que le domaine technique, voire méthodologique, mais aucunement le domaine conceptuel. Un SGBD est un support logiciel qui permet le stockage et l'organisation de données. Il n'est utile qu'une fois que le mode d'organisation des données a été décidé. L'organisation a proprement parler des données est explicitée dans un modèle conceptuel, nommé Modèle Conceptuel de Données (MCD). Un MCD est propre à un ensemble de données d'une part⁴⁵, et un ensemble de problématiques d'autres part⁴⁶. Ce MCD décrit donc les tables, leur composition (attributs) et les liens entre tables qui permettent de mener des interrogations croisées. Par exemple, on peut avoir une table élèves, contenant les informations relatives aux élèves d'un établissement, une table enseignants, et une table classe qui permet de faire le lien

43. MapD est ainsi un SGBD optimisé pour l'analyse sur processeurs graphiques (les GPU), présents dans les cartes graphiques modernes, contrairement aux SGBD classiques qui s'appuient sur les processeurs (CPU) pour effectuer leurs calculs. Dans le cadre de cette thèse, nous n'avions pas accès à un serveur doté de GPU, et MapD est donc installé sur une infrastructure à base de CPU, bien moins performante.

44. Dans les faits, MonetDBLite a été le SGBD utilisé pendant une large partie de la conception de SimEDB. Il s'est toutefois révélé assez instable dans notre cas, faisant preuves à plusieurs reprises de corruptions de données ayant entraîné l'obligation de recréer entièrement les bases de données depuis les fichiers bruts produits par SimFeodal.

45. Le MCD décrit la manière dont les données sont stockées, organisées et mises en relations. Il ne peut donc être générique, et doit être modifié quand la structure des données évolue.

46. Il y a une infinité de possibilité d'organisation d'un même jeu de données. Le MCD permet d'organiser ces données en vue de répondre à des questions, exprimées sous formes de requêtes particulières. Appliquées au même jeu de données, différents MCD permettront de répondre plus ou moins facilement (et de manière plus ou moins performante) à certaines questions.

↑ Pas en

XX

du australie par prendre
un formalisme
objectif: claire / Altalant
au lieu de Telle
a la bâtielle
(telle)
l'objectif est-il
disparu ?

entre les élèves d'un enseignant, ou au contraire entre un élève et tous ses enseignants.

Les choix de conception d'un MCD sont fortement liés aux types de SGBD dans lesquelles ils doivent être implémentés. On ne peut que difficilement implémenter un MCD très relationnel dans un SGBD pensé collection (NoSQL par exemple). À l'inverse, le stockage d'informations très hétérogènes sur un ensemble d'individus sera complexe à implémenter au sein d'un SGBD relationnel. *ou vice versa*.

Pour décider de la manière la plus efficace d'implémenter les données issues de SimFeodal dans un SGBD, et donc du MCD à suivre, il convient de revenir aux spécificités des données produites par le modèle d'une part, et d'autre part de réfléchir aux modes d'interrogations privilégiés, lesquels orienteront la conception du MCD.

Pré-traitement des données. Les données produites par un modèle de simulation sont des données « brutes », c'est-à-dire qu'elles ne sont pas organisées de manière rationnelle, contiennent une quantité non négligeable d'informations incomplètes, superflues ou erronées.

- Par exemple, quand une simulation est arrêtée en cours, soit volontairement, soit en raison d'un *bug*, les données générées par le modèle sont **incomplètes** : elles ne concernent qu'une partie des pas de temps attendus. Elles sont pourtant exportées dans les fichiers bruts, rendant ceux-ci hétérogènes en matière de complétion des informations enregistrées. Pour pouvoir analyser une expérience, il faudra supprimer ces données incomplètes pour qu'elles n'influencent pas l'étude des simulations complétées et donc comparables.
- De la même manière, il arrive qu'on exécute, par erreur, plusieurs fois les mêmes simulations. Dans ce cas, le nombre de réPLICATIONS de chacune des expériences ne sera pas systématiquement le même. Cela pose un problème de comparabilité dû à des tailles d'échantillonnage différentes. On fait donc face à un problème de données **superflues** : il faudra supprimer une partie de ces simulations des données avant de pouvoir les traiter.
- On peut enfin voir subvenir des erreurs d'exécution du modèle au niveau des agents, par exemple quand, en raison d'un *bug*, un agent en interroge un autre qui a disparu depuis. Il arrive ainsi fréquemment que des foyers paysans déclarent une appartenance à un agrégat qui a disparu depuis, *faute à une mise à jour échouée dans le modèle*. Dans ces cas, les données seront aussi inscrites dans les sorties de SimFeodal, quand bien même elles sont **erronées**.

Les données brutes doivent donc nécessairement être vérifiées, filtrées, nettoyées et retravaillées avant de pouvoir les exploiter en vue de générer les indicateurs de sortie.

Organisation des données. Même pré-traitées, les données brutes conservent une structure tabulaire assez peu adaptées à un traitement. Les attributs de chacun des types d'agent sont enregistrés dans des fichiers spécifiques. Que

ces fichiers aient été nettoyés ou non, ils demeurent fondamentalement isolés les uns des autres. Une partie des indicateurs repose sur des analyses croisant différents types d'agents (dans quels pôles les agrégats s'inscrivent-ils par exemple?), et il est donc nécessaire de permettre – et de fluidifier – ces requêtes croisées. On a mentionné le choix de SGBD relationnels, il convient donc de concevoir et d'implémenter, dans le SGBD choisi, les relations entre les différentes tables individuelles qui proviennent des sorties brutes d'un modèle.

5.3.2.1 Quel modèle de données ?

Les MCD sont propres à chaque ensemble de données et questionnement associés. Il y a toutefois des grandes tendances dans l'organisation des données. Le MCD peut ainsi être catégorisé, selon sa forme, dans des familles de modèles de données. On nomme ces catégories « modèles logiques » ou « schémas » (*logical schema* en anglais). Ceux-ci décrivent la manière dont les données sont structurées et surtout reliées les unes aux autres, d'une manière générique contrairement aux MCD.

Un modèle « en étoile ». Les bases de données relationnelles peuvent s'appuyer sur de nombreux schémas différents. Sans entrer dans le détail, notons que chacun des schémas existant présente des avantages et des inconvénients liés aux types de requêtes qui lui seront adressés. Par exemple, un schéma « en étoile » (*Star Schema* 2018) privilégie l'efficacité de requêtes d'agrégations et de jointures, au détriment de la robustesse des données et de la diversité possible des requêtes. Certains types de requêtes, complexes, seront ainsi difficiles, voire impossibles, à exprimer dans ce type de schéma.

Au contraire, un schéma « en flocons » (*Snowflake Schema* 2018) peut se révéler plus permisif en terme de capacités de requêtes. L'inconvénient est une plus forte complexité des requêtes de bases (exprimées de manière plus verbeuses et tortueuses) et donc une expressivité moindre.

Pour choisir un schéma, et donc une manière d'organiser la base de données, il convient donc de savoir – ou de prévoir – le type de requêtes qui lui seront adressées. Dans le cas des données de SimFeodal, les indicateurs avaient été définis avant que le besoin d'une interrogation performante et structurée n'apparaisse. On connaissait déjà les indicateurs nécessaires et le type de requêtes associés. Nous savions ainsi qu'une majorité des requêtes seraient des tâches d'agrégations simples (nombre d'agrégats au cours du temps, taux de foyers paysans dispersés au cours du temps etc.), pour lesquelles il fallait minimiser la complexité des requêtes et calculs.

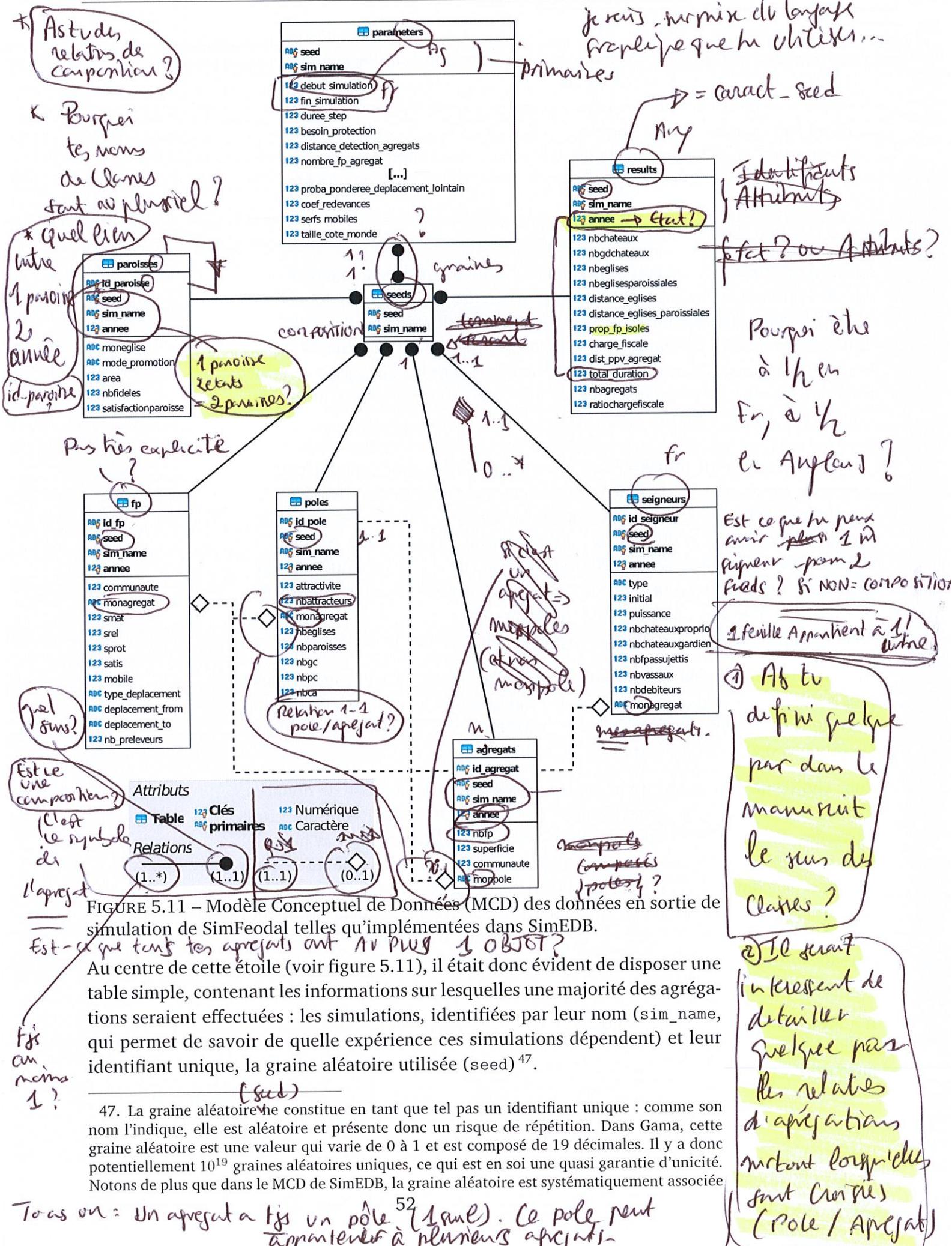
Il a été choisi de partir d'un schéma en étoile, puisque celui-ci se montre extrêmement efficace pour réduire les besoins en jointures – chronophages – et pour des tâches d'agrégation lourdes.

Quel langage graphique
utilises-tu ? VML ?

Est ce que tous tes Agrégats sont ~~sont~~ ont au plus 1 élément ?

Chapitre 5

5.3. ORGANISER LES DONNÉES



— un seul pour appeler au moment donné qu'à 1 sur Composé.

la réponse du couple entre celle de l'agent.

comme import tf.

Relier les tables. Toutes les tables contenant les enregistrements individuels des agents (fp pour les foyers paysans, paroisses pour les églises paroissiales, etc.) sont donc liées directement à cette table centrale (intitulée seeds ici).

Annee ?

En dehors de ces tables liées aux agents, deux autres tables « globales » sont présentes : une table « results », qui contient des informations agrégées sur l'état de chaque simulation à chaque pas de temps. Ces informations, par exemple le taux de foyers paysans isolés (champ « prop_fp_isoles »), sont redondantes : elles pourraient être calculées directement depuis la table renseignant les foyers paysans, en faisant un ratio entre le nombre de foyers paysans sans agrégat et leur nombre total. Pourtant, pour des raisons d'efficacité autant que de clarté, il a été choisi de dupliquer, en les pré-calculant, ces informations qui sont interrogées extrêmement souvent pour calculer les indicateurs de SimFeodal.

Autre table ne répondant pas au schéma classique, la table « parameters » fournit toutes les méta-données sur les simulations. On y retrouve par exemple les valeurs de paramètres de chacune des simulations, identifiées toujours par le couple sim_name et seed. Cette table est la seule à être reliée de manière bidirectionnelle à la table centrale (seeds), en particulier en raison de l'usage qui en est fait interactivement (voir l'encadré 5.2).

les cardinalités étant telles tu pourras les dire :

Notons tout de même que l'on s'éloigne légèrement du classique schéma en étoile en raison des relations que nous avons choisi d'insérer entre les tables des différents agents (relations notées en pointillées dans la figure 5.11). Intégrer ces relations dans la table centrale aurait considérablement complexifié cette dernière, mais pour autant, elles étaient nécessaires : SimFeodal est un modèle complexe, dans lequel des interactions sont présentes à plusieurs niveaux entre différents types d'agents. La base de données résultant de ce modèle complexe l'est donc nécessairement aussi : on doit implémenter, dans la base de données, des relations entre les tables pour chacune des interactions entre les agents du modèle. Ici, ces relations permettent par exemple d'étudier la composition des pôles autour de chaque agrégat, et ainsi d'étudier le lien entre poids du pôle (en nombre d'attracteurs) et poids de l'agrégat (en nombre de foyers paysans).

Ces indicateurs, situés à l'intersection de différents types d'agents, sont toutefois moins utilisés que les indicateurs plus directs (ref à chapitre 3, indicateurs). Les requêtes correspondantes, moins fréquentes, ne perturbent pas les logiques et performances d'ensemble de SimEDB : elles auraient plus facilement exprimées dans un schéma « en flocons », mais leur relative rareté ne remet aucunement en cause l'organisation générale du MCD.

5.3.2.2 Un modèle de données pour favoriser l'interrogation et le filtrage conjoint

Le schéma choisi et le Modèle Conceptuel de Données (MCD) associé, permettent une interrogation rapide des données en simplifiant les tâches d'agrégation.

au nom de l'expérience. Même en menant un million de réplications, la probabilité que deux simulations partagent la même graine aléatoire serait largement inférieure à 1%. La graine aléatoire constitue donc un identifiant unique robuste dans notre cas.

1 Agrégat = plusieurs fp
1! signeur

→ justement ambiguïté.
1 agrégat - 1 pôle ?
Mon pôle

le schéma
celle sur laquelle
est très importante.
Tu pourras
détourner
les classes &
expliquer les
relations.

gation et en minimisant la quantité de jointures nécessaires à la génération des indicateurs de sortie. Le choix de s'écartez légèrement du schéma en étoile présente un autre avantage, extrêmement utile, dans le cadre d'une exploration interactive des indicateurs de SimFeodal. En effet, comme on l'a vu auparavant (section 5.2.6), dans SimEDB, on compare les simulations en les isolant à partir des valeurs de paramètres qui leur correspondent, via un acte de *brushing* des valeurs de paramètres présentées dans un graphique en coordonnées parallèles interactif. Du côté du MCD, la table correspondante est la table `parameters`. Quand l'utilisateur sélectionne un sous-ensemble de valeurs de paramètres, la table est filtrée, et ne renvoie donc que les simulations correspondantes.

C'est ici que l'intérêt de la table `seeds` et de son lien bidirectionnel avec la table `parameters` apparaît : une fois `parameters` filtrée, cette sélection est renvoyée à la table `seeds`, et se répercute donc directement à toutes les autres tables. Avec une unique requête, qui plus est sur une table de faible dimension (`seeds` ne comporte que deux champs), le filtrage est donc extrêmement rapide, accélérant d'autant le filtrage des autres tables et donc la génération des indicateurs de sortie. Ces étapes de filtrage successifs, optimisées par l'architecture choisie pour les données de SimFeodal, sont présentées dans l'encadré 5.2.

Structuration orientée explorator.

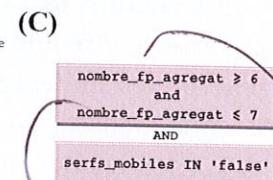
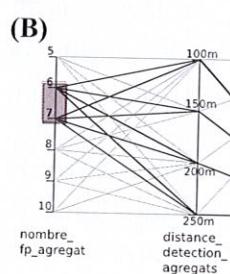
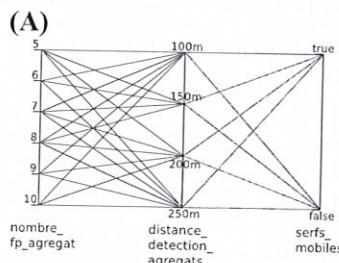
result → 1 instance pour chaque ETAT ?

Donc comment est évalué mettant la fin complete ?

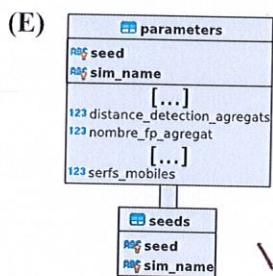
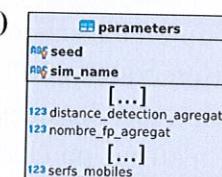
Pour moi c'est les schémas 5.11 & 5.12 que je trouve les plus intéressants et informatifs du coup, j'aurais aimé voir + d'info sur ces points.

Encadré 5.2 : Un exemple d'interrogation de la base de données de SimEDB.

La figure 5.12 présente l'ensemble des étapes qui permettent de générer un indicateur de sortie. Cette planche montre un exemple de sélection faite dans l'application SimEDB, et décrit la manière dont cette sélection est répercutée à travers le MCD de SimFeodal (figure 5.11). La démarche aboutit par la sélection d'un ensemble de données, qui répondent à un critère sur deux paramètres du modèle. Cette sélection est ensuite utilisée pour générer un indicateur de sortie, ici, l'évolution du nombre d'agrégats au cours du temps.

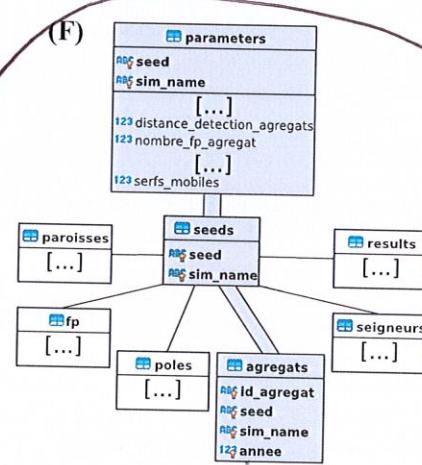


- Depuis un ensemble d'expériences aux valeurs de paramètres variées (A),
- l'utilisateur mène une sélection graphique en effectuant un brushing des valeurs voulues (B).
- Cette sélection graphique est alors formalisée dans le langage de requête SQL (C).



- Cette requête est exécutée sur la table *parameters*.
- On isole alors les attributs *seed* et *sim_name* de cette table (D).
- Ce filtrage est répercuté sur la table des *seeds*, qui ne comprend plus à ce moment que le sous-ensemble des *seed* et *sim_name* correspondant à la requête de l'utilisateur (E).
- Le filtrage effectué sur la table *seeds* peut alors être répercuté sur les différentes tables liées aux agents.

Ok pour la sélection



Comment dit-on graphiquement (RQR)
que l'on sélectionne
à l'échelle
du ns
d'agréat,

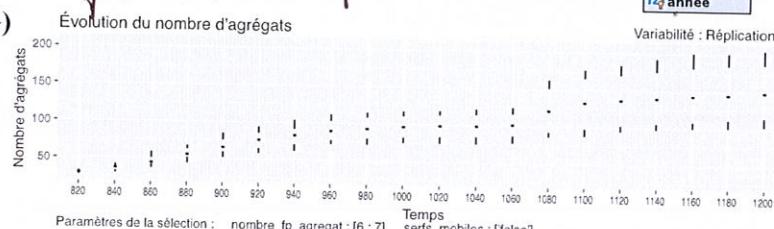


FIGURE 5.12 – De la sélection interactive à l'indicateur de sortie.

Une organisation dédiée à l'exploration interactive

La présentation des choix d'organisation de données témoigne d'une visée résolument applicative, c'est-à-dire visant à penser l'organisation, la structuration et les SGBD d'implémentation, comme au service de la plate-forme d'exploration SimEDB. Le SGBD choisi, MapD, est ainsi un logiciel particulièrement adapté aux besoins identifiés, c'est-à-dire à une efficacité et une robustesse d'interrogation des données générées par SimFeodal. MapD est interrogable de manière universelle, via des protocoles de connexion standards, au moyen d'un langage qui fait office de *lingua franca* de l'interrogation de données, le SQL. Au sein du SGBD, la structure des données, révélée dans le MCD qui adopte une structure « en étoile », vise aussi à faciliter et à optimiser la vitesse des requêtes visant à générer les indicateurs de sortie de SimFeodal. Cette structure de données est enfin pensée, en amont, pour minimiser le nombre de requêtes nécessaires à l'affichage des indicateurs, dans un cadre interactif, correspondant à des sous-ensembles des nombreuses simulations effectuées au cours de la construction, du paramétrage et de la calibration de SimFeodal.

Il est important de noter qu'en l'absence de ces choix de conception de base de données, de la modélisation conceptuelle jusqu'à l'implémentation technique, la plate-forme d'exploration des données SimEDB, que nous allons maintenant présenter plus en détail, n'aurait pu être conçue, élaborée et bâtie de manière convaincante.

5.4 Une plate-forme d'exploration de données de simulations : SimEDB

La section 5.2 (Comment explorer les sorties de SimFeodal ?) a décrit les étapes successives d'avancement dans l'exploration des données en sortie de SimFeodal, depuis l'observation en direct des simulations (« pré-filtrage ») jusqu'au besoin d'une plate-forme permettant l'exploration et la comparaison interactive des sorties de simulation. La plate-forme proposée en réponse à ce besoin, SimEDB⁴⁸, dans un objectif de généréricité et d'adéquation, se devait aussi de répondre à de nombreuses contraintes, aussi bien liées aux possibilités offertes qu'à l'usage qui en serait fait. Dans cette partie, nous nous attacherons donc à présenter les contraintes qui ont guidé la conception de SimEDB, ainsi que les choix, méthodologiques et techniques, qui en ont résulté.

5.4.1 Contraintes

5.4.1.1 Adapter la complexité aux utilisateurs

Dans le domaine de l'Interface Homme-Machine (IHM), il est courant de considérer qu'un outil d'analyse et de représentation doit être adapté à un public. La figure 5.13, emblématique de la conception de géovisualisations par Alan MAC EACHREN, replace ainsi les types d'usage d'une plate-forme d'exploration selon trois axes : le niveau d'expertise des utilisateurs visés (*users*), le niveau d'interaction souhaité (*interaction*) et l'objectif poursuivi par la (géo)visualisation (*task*). D'après l'auteur, à un niveau d'expertise de l'utilisateur correspond un unique degré d'interaction et un unique objectif : dans le cube, seule une « droite » des usages possibles est présente. L'auteur décompose ces usages en quatre types :

- Pour le grand public (*users* de type *public*), l'objectif est de transmettre une information simple (*info sharing*). Le niveau d'interaction avec la géovisualisation doit donc être faible. Il s'agit d'une tâche de présentation (*present*).
- Pour un public légèrement plus connaisseur, on peut augmenter le niveau d'interaction. On entre alors dans un but de synthèse (*synthesize*).
- En ciblant un niveau encore supérieur d'expertise chez l'utilisateur, et en visant à de la construction de connaissance plus qu'à une transmission de connaissance, on augmente encore le niveau d'interaction. La géovisualisation a alors pour but l'analyse (*analyze*).
- Au plus haut niveau d'interaction, d'expertise et de recherche, la géovisualisation peut servir d'outil d'exploration (*explore*).

mais c'est
évidemment une
simplification
pour expliquer

Alan MacEachren
n'est pas dupe...
(à l'anglaise)

48. SimFeodal Exploration DashBoard, voir la note de bas de page 26, section 5.2.6.

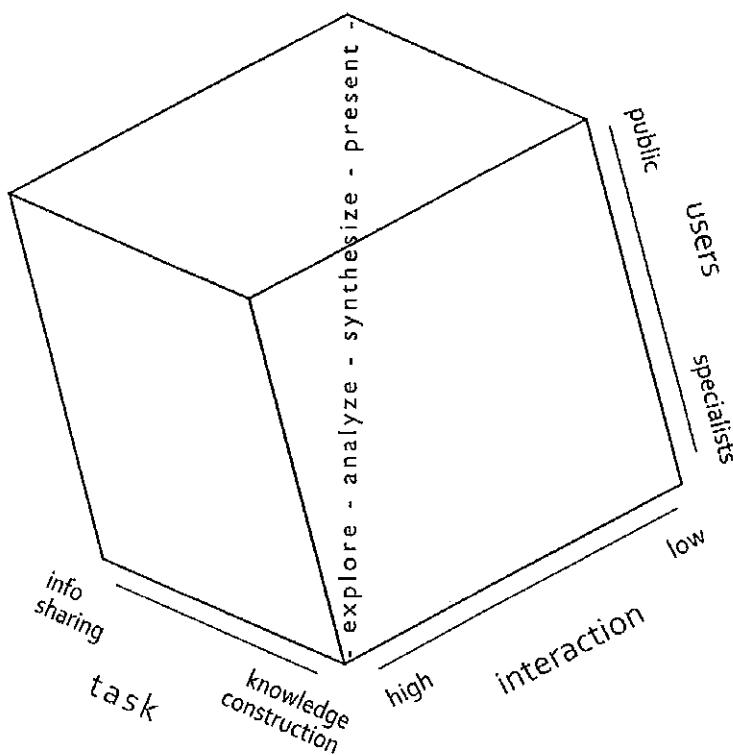


FIGURE 5.13 – « *An update to Cartography³, 10 years after its conception* », par ÇÖLTEKIN, JANETZKO et FABRIKANT 2018, d’après MACEACHREN et al. 2004, p. 10.

ROTH (2015, p. 16) commente cette figure en effectuant une assimilation entre niveau d’interaction et complexité de l’interface de l’outil de géovisualisation : « All participants agreed that user expertise requires increased interface complexity, as suggested by the Cartography³ framework ».

La plateforme SimEDB est conçue pour être utilisée par des experts thématiques (l’équipe de modélisation de SimFeodal), avec un objectif clairement inscrit dans la construction de connaissance. A ce titre, et d’après MACEACHREN, le niveau d’interaction avec l’outil de géovisualisation devrait être élevé (forte complexité de l’interface pour ROTH) et ancrer l’usage dans une dimension exploratoire.

Des utilisateurs hétérogènes mais captifs. SimEDB est pourtant pensé à un niveau intermédiaire, entre l’analyse et la synthèse, dans le cube de la figure 5.13. Il ne s’agit ainsi pas d’explorer des données, au sens de MacEachren, qui sous-entend par cette exploration (*explore*) la recherche d’informations dans un jeu de données inconnu de l’utilisateur. Le besoin identifié consiste à permettre aux utilisateurs d’explorer des sorties de simulation à travers des indicateurs déjà pensés et constitués. Il ne s’agit pas de proposer un outil d’exploration de données brutes, permettant de créer à la volée des nouveaux indicateurs, via une approche d’exploration naïve. Au contraire, l’exploration est guidée par les indicateurs, et la tâche s’apparente plus à de l’analyse de résultats de simulations, voire à de la synthèse des spécificités des résultats issus d’expériences différentes. L’objectif de SimEDB s’écarte donc du modèle de MACEACHREN, puisqu’il ne se situe pas sur la droite des usages (voir la figure 5.14).

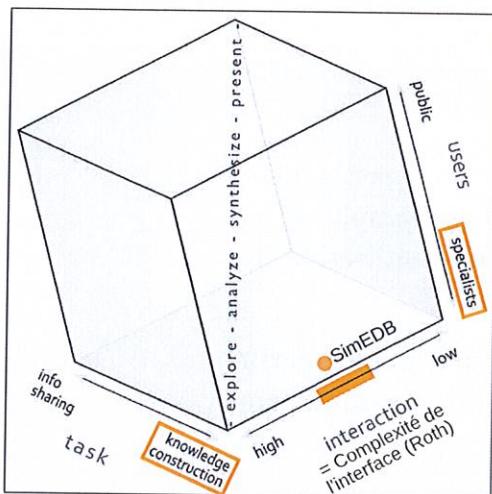


FIGURE 5.14 – Positionnement de SimEDB dans le cube *Cartography*³ de MACEACHREN.

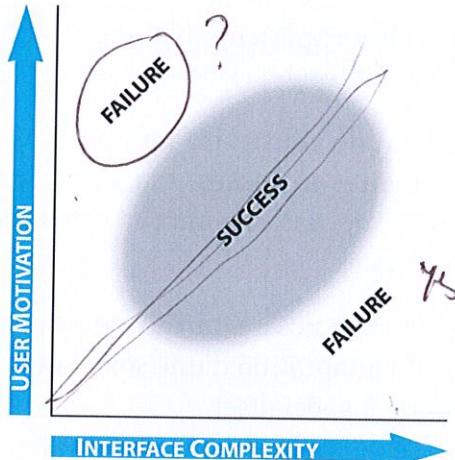


FIGURE 5.15 – « *Interface complexity versus user motivation.* », ROTH 2013, p. 79.

Cet écart au modèle conceptuel de MacEachren s'explique notamment par la diversité des utilisateurs de SimEDB. Il serait absurde de qualifier un niveau d'expertise général des utilisateurs tant les spécificités de cette expertise sont nombreuses. Entre des profils de spécialiste ~~thématiciens~~, de modélisateurs ou encore de géomaticiens, l'expertise est présente, mais concernant des champs différents, toutefois tous intéressés par l'exploration des sorties de SimFeodal.

Il est dès lors peu évident de se fixer sur un degré de complexité à atteindre dans la plate-forme d'exploration : un niveau faible serait frustrant pour les utilisateurs avancés, et un niveau avancé serait source de confusion et donc de perte de motivation pour les utilisateurs moins expérimentés (figure 5.15).

Une spécificité du cas d'usage de SimEDB permet toutefois de miser sur une bonne motivation générale des utilisateurs, et donc sur la possibilité de créer un outil à l'interaction plus complexe qu'un simple présentoir de données. Contrairement à une utilisation grand public, qui ne présente aucun engagement vis-à-vis d'une interface d'exploration de données, ou à l'inverse contrairement à des domaines experts où chaque utilisateur dispose de ses propres outils et méthodes pour explorer un jeu de données, le public cible de SimEDB est « captif ». On entend par là que les utilisateurs concernés par SimEDB ne disposent pas d'autre solution que de passer par cette plate-forme pour explorer les données issues de sortie de simulation, en particulier en raison des contraintes liées aux caractéristiques de ces données (leur masse par exemple, voir la section 5.1.4, Des données aux indicateurs). On peut dès lors se permettre de développer une interface plus complexe que si l'on visait un plus large public.

Oui.
Et en même temps
il y a peu
d'utilisateurs
(peut-être)
La question n'a de
sens si SimEDB
sua utilité pour 1
autre application.

Intuitivité de l'usage au regard des applications traditionnelles. En dépit de cette motivation, les utilisateurs de SimEDB demeurent majoritairement des experts thématiciens, potentiellement peu familiarisés à l'exploration de données interactives. Afin que le temps d'exploration des données issues de SimFeodal soit dévoué à la compréhension et à la synthèse de ces données plutôt qu'à un apprentissage ou amélioration en exploration de données, il a été choisi de créer une application aussi simple que possible au regard des fonc-

tionnalités principales qu'elle devait permettre : observer les indicateurs de sortie de simulation pour des expériences données, et les comparer entre elles aussi efficacement que possible.

Il n'était donc pas question de construire un nouveau « logiciel expert », doté de dizaines de fonctionnalités avancées, mais au contraire, de simplifier au maximum l'interface pour ne pas encombrer et complexifier l'utilisation de ces fonctionnalités principales.

On souhaitait une plate-forme aussi épurée que possible, plutôt que de partir sur la personnalisation et l'adaptation d'une solution existante, nécessairement générique et donc difficile à spécialiser.

5.4.1.2 Efficacité

Dans la description du choix du SGBD, on a mentionné une première fois l'intérêt de disposer d'une solution d'interrogation de données qui garantisse une certaine rapidité dans l'exécution des requêtes. Sans entrer dans le détail des recherches en IHM, on peut compléter ce besoin de rapidité par deux aspects complémentaires. Une solution interactive qui minimise les latences permet (1) de motiver l'utilisateur, c'est-à-dire de ne pas le décourager d'utiliser l'application, et (2) de lui faire conserver sa concentration⁴⁹ (*focus*).

Le premier point a été abordé plus haut (section 5.3.1.2), et surtout, en raison de la « captivité » de l'utilisateur évoquée ci-dessus, ne s'applique que marginalement à notre cas d'étude. Des délais trop importants pourraient décourager l'utilisateur, mais en l'absence d'alternative pour explorer les sorties de simulation, cela n'a pas un impact trop important.

Conserver la concentration. Le problème de la concentration de l'utilisateur demeure, lui, critique. Des études ont montré, depuis longtemps (MACKENZIE et WARE 1993), qu'il y avait un lien fort entre la performance d'une interrogation visuelle et le délai nécessaire à son obtention. LIU et HEER 2014, p. 8 montrent ainsi qu'avec un simple délai de 500 millisecondes (ms), la qualité des observations, des généralisations qui peuvent être tirées des données, et des hypothèses émises, décroît nettement chez l'utilisateur. Les auteurs indiquent d'ailleurs que cette diminution est plus importante encore quand l'exploration est effectuée par des actions de *brushing* et de sélections croisées (*linking*), deux méthodes qui sont au cœur de SimEDB : « For example, more aggressive caching or prefetching methods may be employed for operations sensitive to small variations in latency, such as brushing and linking » (ibid., p. 9).

FORCH et al. 2017, pour leur part, étudient la perception du délai de réponse

49. Avant de spécifier ce sujet, notons que quand le délai entre une interaction avec un outil informatique et le retour qu'il doit produire (affichage de graphique par exemple) est important, l'utilisateur perd en capacité d'association entre son action et le retour observé. Typiquement, dans un processus d'exploration de données, plus ce délai est faible, plus l'utilisateur peut mobiliser son intuition pour évaluer, par exemple, les relations entre des variables ou des individus.

lors d'interactions menées avec une souris d'ordinateur. Ils concluent ainsi que les utilisateurs perçoivent des délais d'attente inférieurs à 100 ms, mais notent que les utilisateurs n'en sont pas pour autant perturbés, en particulier ceux qui ont le moins l'habitude de réactions rapides⁵⁰.

Concernant le champ, plus spécifique, des *visual analytics*, nous n'avons pas trouvé d'articles de référence permettant d'établir une comparaison de l'efficacité des résultats trouvés selon la latence de la réponse. Les auteurs de ce champ recommandent largement de prêter attention à la rapidité de rendu et à son optimisation :

« When simple pattern finding is needed, the importance of having a fast, highly interactive interface cannot be emphasized enough. If a navigation technique is slow, then the cognitive costs can be much greater than just the amount of time lost, because an entire train of thought can become disrupted by the loss of the contents of both visual and nonvisual working memories. »

WARE 2012, tiré de AMIRPOUR AMRAII 2018, p. 12.

On est peu de chose...

De manière plus précise, on retrouve une quantification, en termes d'ordres de grandeur, des délais acceptables dans un processus d'exploration de données : « However, due to human cognitive constraints, exploration needs highly responsive system response times [...] : at 500 ms, users change their querying behavior; past five or ten seconds, users abandon tasks or lose attention » (FEKETE et al. 2019, p. 2). Ces auteurs font référence à un billet de blog de Jakob NIELSEN qui donne une justification plus poussée en matière de capacité de concentration.

« When the computer takes more than 0.1 second but less than 1 second to respond to your input, it feels like the computer is causing the result to appear. Although users notice the short delay, they stay focused on their current train of thought during the one-second interval.

[...]

After 1 second, users get impatient and notice that they're waiting for a slow computer to respond. The longer the wait, the more this impatience grows; after about 10 seconds, the average attention span is maxed out. At that point, the user's mind starts wandering and doesn't retain enough information in short-term memory to easily resume the interaction once the computer finally loads the next screen.

More than 10 seconds, and you break the flow. Users will often leave the site rather than trying to regain the groove once they've started thinking about other things. »

NIELSEN 2009.

Selon ces différentes considérations, dans le cadre de SimEDB, on doit donc viser à développer une plate-forme aussi rapide que possible. Celle-ci doit donc

50. Ils remarquent ainsi que les utilisateurs plus habitués à des jeux vidéos rapides (« highly dynamic computer games, such as action games, racing games, or first person shooter games [...] », FORCH et al. 2017, p. 51) sont plus vite affectés par le délai de réponse que les autres.

viser des temps de latence maximale de 10 secondes, tout en sachant, dès le départ, qu'il sera impossible d'arriver aux délais de 100 ms ou 500 ms évoqués précédemment, ne serait-ce que parce que le temps de requête des données – sans compter le temps de rendu graphique – est déjà supérieur d'un ordre de grandeur.

5.4.1.3 Interopérabilité et évolutivité

Une autre contrainte forte tient cette fois au choix de l'environnement informatique qui accueillera la plate-forme d'exploration. On peut résumer ce choix à deux alternatives : un environnement local, en installant l'application sur l'ordinateur de chaque utilisateur, ou un environnement distant, où l'application serait donc accessible à distance, par exemple via une interface web⁵¹. Ce choix a des nombreuses répercussions, aussi bien en matière de possibilité d'accès que de facilité à faire évoluer la plate-forme.

Jusqu'à récemment, le choix le plus classique était de développer une application installable sur un ordinateur : cela permet de garantir une utilisation à tout moment, sans contrainte d'accès au réseau internet. Cela permet aussi d'obtenir de meilleures performances, puisque la rapidité de l'application dépend à ce moment uniquement de la puissance de l'ordinateur, plutôt que de devoir souffrir du passage par l'intermédiaire d'un serveur.

Comme pour le choix du type de SGBD, nous avons cependant préféré nous orienter sur une solution de type distante, pour des raisons d'interopérabilité et d'évolutivité que nous allons décrivons ici.

Différents supports d'interrogation. La performance d'une application locale, par rapport à une application distante, est un atout extrêmement intéressant, comme on vient de le montrer plus haut. Pourtant, cela implique une énorme contrainte : l'application doit être interopérable entre les différents systèmes d'exploitations (*Operating System, OS*) et versions de ceux-ci. Les utilisateurs potentiels de SimEDB, représentation fidèle des acteurs de la recherche, se partagent ainsi entre les trois systèmes d'exploitations majeurs (Windows, MacOs, Linux).

Pour permettre à chacun d'utiliser SimEDB, il faudrait donc que le développement de cette plate-forme soit compatible avec ces différents OS, ce qui est une contrainte considérable en développement logiciel.

Ne mentionnons même pas les nouveaux OS, centrés autour d'usages tactiles, tels qu'on les retrouve sur les tablettes et autres *smartphones*, qui demandent, eux aussi, de nombreuses spécificités de développement.

En somme, disposer d'une application locale universelle, c'est-à-dire utilisable quelque soit le support informatique, est une quasi-impossibilité technique, et

51. Cette question était également posé pour le choix du SGBD en section 5.3.1.1. L'outil d'exploration et l'architecture de données sont cependant indépendants, et le choix d'un stockage des données sur un serveur distant n'implique aucunement que l'application suive la même logique. On peut ainsi avoir un SGBD distant qui serait interrogé par une application locale.

un objectif en soit, que notre travail de recherche ne cherche aucunement à résoudre. Pour garantir la faisabilité d'une plate-forme d'exploration de données locale dédiée aux données de simulation de SimFeodal, il faudrait donc commencer par restreindre son champ d'application à un ou deux supports officiels, par exemple l'OS Windows, abandonnant de fait les utilisateurs potentiels ne disposant pas de cette architecture logicielle.

Gérer les mises à jours et modifications. Comme pour les bases de données (« Stockage distribué ou centralisé », section 5.3.1.1), la question de l'application locale ou distante pose un contrainte supplémentaire en matière de maintenabilité et d'évolutivité de la plate-forme choisie. Dans le cadre d'une application locale (correspondant au distribué en SGBD), la distribution des différentes mises à jour de l'application entraînent nécessairement l'installation locale, à chaque fois. Le risque est alors que tous les utilisateurs ne disposent pas d'une même version, ce qui peut entraîner, par exemple, des contradictions dans l'évaluation d'expériences, certains utilisateurs ayant accès à une version proposant des différences dans la manière de calculer ou d'afficher les indicateurs.

Sans aller jusqu'à ces extrêmes, notons qu'avec une application locale, le temps de répercussion d'une modification du code de la plate-forme est plus important : il faut en effet réinstaller sur chaque poste le logiciel ainsi modifié. Cela disqualifie de fait des modifications « en direct », par exemple lors d'une session collective d'exploration des résultats où les utilisateurs auraient des propositions de modifications à faire, ne serait-ce que pour des changements aussi infimes que des titres de graphiques ou d'axes.

Le choix d'une application web. Au contraire, avec une application distante, donc basée sur l'accès, par un navigateur internet, à une application centralisée, ces problèmes ne se posent pas : **des navigateurs sont disponibles pour tous les OS existants** (OS dédiés aux ordinateurs ou aux usages mobiles), et interprètent de la même manière une page web, indépendamment de leur support de consultation. De plus, comme pour les SGBD, l'usage d'une plate-forme distante permet une répercussion instantanée des mises à jour et corrections : un utilisateur n'a qu'à rafraîchir sa page pour que la dernière version de l'application s'affiche. De la même manière, si un utilisateur souhaite étudier un nouvel indicateur, non prévu auparavant, le temps de déploiement peut être suffisamment court pour que cela soit possible au cours d'une même session d'exploration de données.

Il y a toutefois un désavantage vis-à-vis de solutions entièrement locales, puisque les données permettant l'affichage des indicateurs doivent transiter sur le réseau internet. En cas de connexion lente, l'usage de l'application sera particulièrement difficile, et même impossible en l'absence d'une connexion.

Cette lenteur relative est toutefois compensée par un avantage de la centralisation de l'application : les calculs, parfois lourds, ne reposent pas sur les capacités individuelles des ordinateurs clients. En installant l'application sur un serveur dédié, il suffit donc d'augmenter les caractéristiques de celui-ci

pour que les performances soient améliorées pour chacun des utilisateurs de l'application.

Dans le cas de SimEDB, nous disposons de ressources informatiques largement suffisantes⁵² pour assurer une rapidité de traitement des données et ainsi permettre à l'application SimEDB de se dégager de ce « goulot d'étranglement » technique qu'aurait sinon éprouvée la plate-forme.

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

La dernière contrainte, plus technique, tient au besoin de généricité d'une plate-forme d'exploration de données vis-à-vis des données qu'elle interroge. On a résumé les possibilités et choix effectués en matière de SGBD (section 5.3.1 : « Assurer la capacité d'interrogation des données »), et décidé de ne retenir que des SGBD permettant une interrogation standardisée via des connecteurs génériques et un langage universel (le SQL).

L'infrastructure de stockage et d'organisation des données a ainsi été conçue pour être aussi générique que possible. Encore faut-il que la plate-forme d'exploration de données soit elle aussi aussi générique que possible, et donc en mesure de profiter de l'universalité du SGBD choisi.

Indépendance vis-à-vis du support de données. Une contrainte forte est donc constituée par la capacité de la plate-forme à être indépendante de la source des données : quelque soit le SGBD choisi, les requêtes émises par la plate-forme doivent être les mêmes, sans requérir d'adaptations spécifiques en dehors de la désignation du lieu de stockage des données et des pilotes du SGBD.

Dans les faits, lors de la construction de SimEDB (cf. section 5.2 : « Comment explorer les sorties de SimFeodal ? »), plusieurs solutions de stockage de données ont été employées successivement, au fur et à mesure des limites rencontrées chez chacune. Depuis les premières implémentations des rapports automatiques jusqu'à l'utilisation de SimEDB dans son état actuellement discuté, les données de sorties de simulation ont ainsi été tour à tour interrogées depuis de simples fichiers CSV au départ jusqu'au SGBD ultra-performant MapD, en passant par des solutions intermédiaires plus classiques (SQLite et MonetDB notamment).

Il n'était donc aucunement question d'avoir à adapter le code source des programmes permettant de générer les indicateurs depuis les données, mais au contraire, de s'assurer d'utiliser des bibliothèques logicielles indépendantes des données, c'est-à-dire capables d'exécuter les mêmes chaînes de traitements quelle que soit la provenance des données.

On peut expliciter ce propos à l'aide de l'exemple caricatural des logiciels de

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

type tableurs. Dans ce type d'application, on peut écrire des programmes (les « macros ») qui permettront l'ouverture d'un fichier CSV et effectueront des calculs dessus pour en tirer par exemple des résumés. Dans ce même tableur, on peut aussi faire appel à des sources de données différentes (bases de données Access ou SQL par exemple), mais les programmes (macros) seront alors à réécrire en quasi-totalité pour les adapter aux différences de sources de données.

Dans notre cas, les sources de données ayant très largement évolué au cours du temps, on ne pouvait faire reposer notre application sur une plateforme qui demande une adaptation forte à la provenance des données, comme c'est le cas des tableurs. Il était donc nécessaire de s'appuyer sur des environnements logiciels (les bibliothèques logicielles) permettant une forte générnicité vis-à-vis des sources de données.

Indépendance vis-à-vis des requêtes et modularité de l'implémentation. Pour garantir cette générnicité, il est donc nécessaire de s'assurer que le mode de communication de la plate-forme vers les données soit bien basé sur un langage universel : le SQL. Il convient donc de choisir un ensemble de technologies permettant de générer des requêtes SQL, quand bien même l'expression de ces requêtes elles-mêmes serait conçue dans un autre langage. Pour les requêtes complexes, le SQL tend en effet à être peu lisible, les opérations s'emboîtant les unes dans les autres de manière très linéaires, et donc, souvent verbeuses. En SQL pur, il est donc peu évident de créer une implémentation modulaire d'une requête, c'est-à-dire permettant une factorisation des commandes et un paramétrage des entrées.

etc.) ↴ au cours...

Les indicateurs de sortie de SimFeodal sont, on l'a vu, assez fréquemment basés sur le même type d'opération : on observe par exemple souvent l'évolution du nombre d'agents d'un certain type (agrégats, foyers paysans...) au cours du temps. Dans le cas de cet exemple, en SQL, pour spécifier une requête permettant de récupérer le nombre de foyers paysans au cours du temps, groupés par année et avec un filtre sur certaines simulations, il ne faut que quelques lignes de code. Pour que cette requête devienne générnicie, c'est-à-dire indépendante du type d'agent qui en deviendrait un argument, il est nécessaire d'y ajouter de nombreuses lignes de code. Cela revient potentiellement à doubler, pour chacun des indicateurs, la longueur du code-source requis pour l'expression des requêtes, et bien sûr à les rendre plus complexe à modifier et corriger. De plus, les modes d'expression qui permettent de modulariser du code SQL peuvent varier fortement selon les SGBD choisis, n'étant pas strictement décrits dans les normes SQL. Par exemple, la déclaration d'une variable, par exemple pour paramétriser le nom de la table contenant les agents, est très différente dans les deux SGBD les plus utilisés (MySQL et PostgreSQL).

Faire appel à un langage intermédiaire, générant du SQL en sortie depuis une entrée sous forme d'un « *Domain Specific Language* » (DSL) permet ainsi de bénéficier d'une part de l'universalité du SQL, et d'autre part, d'une syntaxe plus expressive que celle du SQL. En utilisant un DSL, plus adapté à la manipulation de données qu'à la sélection de sous-ensembles, on gagne donc en modularité d'implémentation , et donc en ré-utilisation de fonctions plus générniques, ce

qui permet de disposer d'un code-source plus robuste, ré-utilisable et évolutif.

Conclusion : Vers une plate-forme web générique et intuitive

Dans cette sous-partie, nous avons présenté les principales contraintes qui ont orienté le choix des cadres méthodologiques et techniques utilisables pour concevoir une plateforme telle que SimEDB.

En premier lieu, on fait le choix de se tourner vers une plate-forme implémentée sous forme d'application web, utilisable depuis un simple navigateur – donc inter-opérable entre les différents supports technologiques –, ce qui exclue de fait quantités d'outils, de logiciels et de bibliothèques logicielles pensées pour l'exploration interactive de données.

On souhaite de plus que la plate-forme utilisée dispose d'une interface aussi épurée que possible, donc nécessairement très adaptée au cas particulier des données issues de simulation que l'on manipule. Là encore, l'étendue des possibles est restreinte, éliminant l'ensemble de solutions « clefs-en-main », par exemple conçues autour des « webSIG » ou de bibliothèques logicielles de visualisations interactives intégrées.

L'utilisation de la plate-forme doit être aussi efficace que possible, en cherchant à minimiser les temps de latence entre sélection interactive et affichage des indicateurs en résultant. On devra donc privilégier des ensembles technologiques récents et performants, intrinsèquement dédiés à l'interactivité, au détriment de *frameworks* plus génériques.

Enfin, il faut que cette solution, dans la mesure du possible, soit en mesure de proposer une syntaxe d'interrogation de données modulaire, factorisée, et plus expressive que le SQL sur lequel elle doit toutefois s'appuyer.

Ces contraintes sont des éléments génériques à prendre en compte dans la conception d'un outil d'exploration de données, et elles dépassent largement notre seul cas d'utilisation. Nous n'avons pour autant pas tenté de brosser un paysage complet des contraintes potentielles, liées aux différents usages possibles, qui peuvent guider les choix techniques et méthodologiques de la conception d'un outil. La relative spécificité de SimEDB tient à la combinaison des contraintes identifiées et à la combinaison des choix effectués pour les dépasser, que nous allons maintenant expliciter.

5.4.2 Construire une plate-forme interactive pour l'exploration de sorties de simulation

Dans cette dernière sous-partie, nous allons donc présenter les choix – techniques, esthétiques et interactifs – qui ont été adoptés dans la conception et l'implémentation de SimEDB. Nous les présentons ici de manière linéaire, dans l'ordre quasi-chronologique du développement, mais il est important de garder en considération que ces éléments sont intimement intriqués. Un choix technique, par exemple, peut conditionner les types d'interactions possibles, parce que l'utilisation de telle méthode d'interaction peut n'être proposée que dans tels et tels environnements logiciels.

Notons enfin que l'application SimEDB présentée ici, aussi bien dans son usage que dans sa conception, représente un instantané de développement, qui correspond à la période de rédaction du présent chapitre : à l'instar d'un modèle, une plate-forme peut et doit évoluer pour s'adapter aux besoins de ses utilisateurs tant qu'elle est utilisée. Les technologies et choix esthétiques introduits n'ont pas toujours été présents, et auront sans doute à évoluer dans la suite de la « durée de vie » de SimEDB. Pour les raisons évoquées en termes de facilité de mise à jour d'une solution distante, cela ne pose toutefois aucun problème vis-à-vis de l'utilisation de la plate-forme, largement indépendante, en matière de temporalités, du présent ouvrage.

5.4.2.1 Choix des technologies

Nous présentons ici les technologies mobilisées dans le cadre du développement de SimEDB. Le but n'est pas d'entrer dans les détails de l'implémentation⁵³, mais bien de justifier et présenter les choix relatifs aux technologies employées, en restant à un niveau assez général⁵⁴. Il nous paraît important d'entrer dans ces choix qui relèvent plus de la technique que de la méthodologie en ce qu'ils concourent de la volonté de reproductibilité de la thèse, et particulièrement de la reproductibilité de la démarche, conceptuelle et méthodologique, mise en place. Nous portons la conviction que l'ensemble de technologies assemblées ici dans notre « chaîne de traitement » est très largement ré-utilisable, dans le cadre d'adaptations à d'autres cas d'études, mais aussi et surtout, pour une multitude de problématiques requérant une analyse visuelle de données massives (on y reviendra dans le chap 7).

Technologies webs « natives » et adaptativité. Au cours de la dernière décennie, les interfaces physiques de consultation de médias informatiques se sont largement diversifiées. Cela a provoqué une hétérogénéisation importante aussi bien des modes d'interaction (dispositifs « tactiles ») que des modes d'affichages (les tailles et résolutions des écrans n'ont jamais été aussi diverses et imprévisibles).

53. Le code source de SimEDB – et l'historique de son versionnement – sont, pour cela, disponibles en ligne sous licence libre, sur la plate-forme Github : github.com/RCura/SimEDB

54. À ce titre, les quelques lignes de codes présentes par la suite servent un but illustratif et descriptif, et nous semblent remplir ce rôle bien plus efficacement que n'importe quel schéma structurel ne le pourrait.

En conséquence, les normes de présentations graphiques ont évolué, vers plus d'« adaptativité », en particulier avec l'avènement du « responsive web design » (« conception de sites web adaptatifs ») qui permet de prévoir efficacement l'agencement d'une page web quelque soit le support de consultation.

Les technologies qui prédominaient dans la réalisation d'applications web interactives il y a quelques années⁵⁵ ont largement disparu suite à un manque d'adaptation à ces nouveaux supports.

Pendant ce temps, de nouveaux standards du développement web (HTML5 entre autre) ont émergé et atteint un niveau de maturité suffisant pour remplacer l'ensemble des possibilités (et les étendre) proposées par ces anciens environnements trop monolithiques.

Ces technologies, aujourd'hui indispensables, reposent sur des codes standardisés, verbeux et peu explicites⁵⁶, mais toutefois assez universellement interprétables par les navigateurs. Pour pallier à leur faible expressivité, on peut faire appel à des *frameworks* graphiques qui en simplifient l'usage : comme les DSL évoqués plus haut, ce sont des ensembles de bibliothèques logicielles qui génèrent à l'aide d'instructions courtes et simples les centaines de lignes de codes nécessaires à l'affichage interopérable, universel et constant d'un site ou d'une application web.

Nous avons donc fait le choix de nous concentrer sur des environnements standardisés, capables de générer du HTML (« *HyperText Markup Language* »), lui-même mise en forme à l'aide de styles CSS (« *Cascading Style Sheets* ») et rendu interactif par du code JavaScript.

À ce titre, le framework Bootstrap⁵⁷ s'est révélé extrêmement utile dans le *design* de l'interface de SimEDB (et des versions précédentes), tant il simplifie l'expressivité d'une mise en page à l'aide d'une grille graphique et de composants interactifs ré-utilisables.

Le choix d'environnements de développement intermédiaires.⁵⁸ Pour construire des applications interactives en lignes, de multiples choix sont possibles, et on peut les catégoriser selon le niveau de développement qu'ils demandent. Par exemple, il est tout à fait possible de s'appuyer sur des briques logicielles de bas niveau (ce que l'on appelle communément *framework*), et de développer à partir de celles-ci toute l'interface et le fonctionnement d'une application.

Cette approche, majoritaire dans la construction d'applications actuelles (avec des *frameworks* basés sur le langage JavaScript tels que ReactJS ou AngularJS,

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

56. Il suffit de consulter le code-source d'une page web contenant des visualisations interactives pour le constater. Les assemblages de langages SVG, CSS et JavaScript sont ainsi assez largement indéchiffrables pour qui n'en est pas un spécialiste.

57. <http://getbootstrap.com/>

58. Ne pas oublier, dans le positionnement (chap1) de consacrer au moins un paragraphe (ou encadré) au choix « militant » de ne se tourner QUE vers des outils libres, sans exception.

ou encore sur le langage Python tels que Django ou Flask), est extrêmement flexible et performante, au prix d'un développement important. Un *framework* fournit en effet des « briques » logicielles de base – les composants –, très génériques. Ces composants de bases demandent donc une forte personnalisation et un agencement complexe afin d'arriver au résultat souhaité. La communication entre ces composants doit être entièrement prévue et implémentée, et on aboutit donc nécessairement sur des projets assez importants, qui demandent une réelle expertise en développement et portent le risque d'être trop complexes pour être facilement adaptés et donc rendus génériques.

À l'autre bout du gradient de développement, on peut aussi choisir de bâtir une application à partir d'un ensemble logiciel intégré, comme Tableau, qui permet d'agencer visuellement et graphiquement des composants graphiques et leurs liens. Ces outils, très usités en informatique décisionnelle, sont extrêmement simples à prendre en main, y compris pour des « utilisateurs finaux » – analystes par exemple –. En contre-partie, ils sont moins personnalisables et configurables que des solutions plus bas niveau comme les *frameworks*, et ce sont majoritairement des logiciels propriétaires, donc non modifiables.

Entre ces deux extrêmes, quelques *frameworks* intermédiaires, souvent originaires des outils de manipulation de données plus que du monde de l'informatique décisionnelle, mettent à disposition de l'utilisateur des composants de plus haut-niveau que les « briques élémentaires ». L'interaction entre les composants y est déjà pré-conçue, tout en reposant sur une construction « depuis zéro », donc personnalisables et adaptables.

Généralement, chaque *framework* est associé à un langage de programmation (voir tableau 5.2) : le *framework* Shiny s'appuie sur le langage R, Dash sur le langage Python et Escher sur le langage Julia.

Framework	Shiny	Dash	Bokeh	Escher	Observable
Référence	CHANG et al. 2015	PLOTLY 2017	BOKEH 2014	GOWDA 2018, d'après BEZANSON et al. 2014	BOSTOCK 2018
Langage	R	Python	Python	Julia	JavaScript / D3.js
Maturité	++ (2012)	- (2017)	+	↔ (2016)	+(2017) (D3 : 2011)
Communauté	++	↔	+	-	+
Connaissance personnelle	++	-	↔	-	-

TABLEAU 5.2 – Une sélection de différents *frameworks* dédiés à la création d'interfaces d'exploration de données.

Le choix de tel ou tel framework dépend certes de la maturité de chaque projet – Shiny est à ce titre très en avance –, mais surtout du langage informatique que le concepteur de l'application souhaite utiliser. Dans le cas de SimEDB, le créateur de la plate-forme est adepte du langage R (voir COMMENGES et al. 2014) et pratique le *framework* Shiny depuis plusieurs années (voir CURA 2015) : le choix d'utiliser ce *framework*, au sein d'un environnement logiciel

basé sur le langage R, était donc assez évident.

Manipuler les données avec R et dplyr. Les langages de programmation, et en particulier les plus utilisés en analyse de données, reposent souvent sur une architecture logicielle modulaire. Le langage constitue un cœur, autour duquel des bibliothèques logicielles (des *packages* en R) viennent ajouter des fonctionnalités. Parmi ces bibliothèques logicielles, en Python comme en R, certaines sont entièrement dédiées à la manipulation de données tabulaires – on parle alors de « Data Manipulation Language » (DML) – et permettent d'effectuer des traitements avec des approches fonctionnelles, plutôt qu'avec les structures impératives plus fréquemment utilisées en programmation. En R, ces *packages* constituent de véritables écosystèmes, dotés de leur propre DSL (voir p. 65) et donc d'une grammaire de manipulation de données propre.

L'un de ces *packages*, *dplyr* (WICKHAM et al. 2015), s'inscrit dans un écosystème dénommé tidyverse (WICKHAM 2017), et permet ainsi de chaîner des opérations de manipulation de données en une chaîne de traitement complète, plutôt que de faire appel aux habituelles boucles de parcours de matrices propres aux langages de programmation classiques. Ce faisant, avec des opérations chaînées, qui reposent sur des « verbes » permettant d'effectuer des traitements de restructurations, de modification, de filtrage ou d'enrichissement d'une donnée tabulaire⁵⁹, on obtient un ensemble d'instructions qui forment une « phrase » de manipulation de données, exprimées donc dans la « grammaire de traitement de données » fournie par *dplyr*.

Cette « grammaire » s'inspire notamment du SQL, bien que beaucoup plus complète, et peut en particulier être convertie en SQL (figure 5.16), c'est-à-dire qu'une suite d'instructions exprimées via *dplyr* en R (figure 5.16a) peut être traduite en SQL (figure 5.16b), et donc envoyée et exécutée sur un SGBD.

En matière de performance, l'approche de *dplyr* est intéressante : toutes les opérations sont effectuées par le SGBD directement, et seul le résultat final est renvoyé à R (instruction `collect()`). Le traitement de données bénéficie donc de la rapidité d'exécution du SGBD MapD, tout en profitant de la syntaxe expressive de *dplyr*. De plus, cela permet de minimiser les transferts de données : en exécutant les calculs dans le SGBD, il n'est besoin que d'en renvoyer le résultat à l'utilisateur. Et ce résultat est nécessairement moins lourd que les données dont il provient. On optimise ainsi l'utilisation de bande-passante internet.

59. Les fonctions de base sont donc des « verbes », au sens où elles définissent les opérations qui seront effectuées sur les données. On peut ainsi isoler des colonnes avec le « verbe » `select`, filtrer les lignes avec `filter`, modifier une colonne avec `mutate` etc. La figure 5.16a en donne un exemple commenté et concret.

```

NombreAggregatParAnnee <- tbl(conMapD, "agregats") %>% # Connexion à la table agregats de la BDD
filter(sim_name == "5_0") %>% # Filtre de la table en ne conservant que les expériences "5_0"
group_by(sim_name, seed, annee) %>% # Agrégation sur les identifiants de simulation (seed et sim_name) et par année
summarise(NbAggregats = n()) %>% # Calcul du nombre total de lignes pour chaque agrégation
arrange(sim_name, seed, annee) %>% # Tri de la table selon les trois variables
collect() # Récupération du résultat de la requête en mémoire

```

(a) Code source R avec le package dplyr

```

SELECT "sim_name", "seed", "annee", COUNT() AS "NbAggregats"
FROM "agregats"
WHERE ("sim_name" = '5_0')
GROUP BY "sim_name", "seed", "annee"
ORDER BY "sim_name", "seed", "annee"

```

(b) Traduction du code source dplyr en SQL

FIGURE 5.16 – Un exemple de manipulation de données stockées dans un SGBD depuis R. On y interroge la table des agrégats de population pour calculer le nombre moyen d'agrégats par année de simulation.

Création de graphiques avec ggplot2 et la « grammar of graphics ». En interrogeant le SGBD avec des outils adaptés, on obtient un jeu de données qui servira de base à la représentation graphique des indicateurs (figure 5.17, étape 1). On peut passer alors passer à l'étape de construction graphique des indicateurs. Il existe pour cela, toujours en restant de l'environnement (et du langage) R, de nombreux packages dédiés.

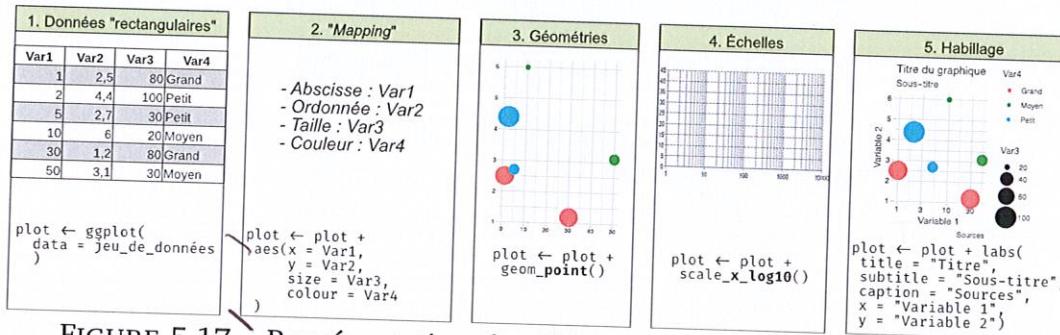


FIGURE 5.17 – Représentation des éléments de grammaire de ggplot2, d'après une idée de HEALY (2018).

TRA

L'un des packages les plus utilisés, ggplot2 (WICKHAM 2016), met en œuvre une syntaxe assez adaptée à nos contraintes : ce package est conceptuellement fondé sur la « grammar of graphics », c'est-à-dire une vision modulaire et très structurée de la conception graphique, pensée par Leland Wilkison (WILKINSON 2006). La logique, assez familière pour un utilisateur de Systèmes d'Information Géographique (SIG), consiste à penser une représentation graphique comme un ensemble de couches (*layers*), qui se superposent, se complètent, et sont toutes basées sur une source de données. Les différentes composantes des données (variables par exemple) sont associées à des composantes graphiques de base (abscisse, ordonnée, taille, couleur ...), formant ainsi une mise en correspondance (*mapping*) des données avec les composants graphiques (voir figure 5.17, étape 2).

Dans notre cas, cette grammaire est porteuse d'un avantage majeur. Elle est extrêmement structurée et modulaire. Cela permet de ré-utiliser largement les codes-sources écrits pour un indicateur et de les adapter aisément à d'autres

indicateurs. Si la grammaire du graphique est bien définie, elle sera ainsi très indépendante du contenu des données que l'on y insère.

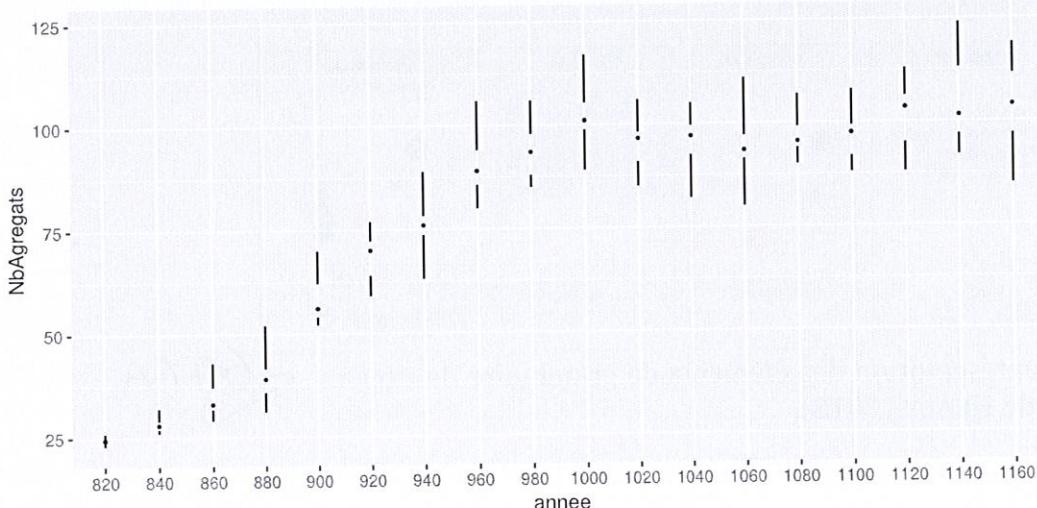
Par exemple, de nombreux indicateurs de sortie de SimFeodal décrivent l'évolution du nombre d'agents au cours des années de simulation (les agrégats dans la figure 5.18). Ce type de graphique est d'une part rapide à produire avec ggplot2 : il ne requiert que quelques lignes de code (figure 5.18a). D'autre part, en changeant le tableau de données en entrée (créé dans figure 5.16a), on reproduit exactement le même type de graphique pour, par exemple, un autre type d'agent (le nombre de foyers paysans, d'églises...).

Le *package* ggplot2 répond tout à fait aux contraintes de modularité exposées plus haut, et permet de factoriser le code-source, ce qui garantit une maintenance plus rapide et une meilleure robustesse de l'application dans son ensemble.

```
ggplot(NombreAggregatParAnnee) + # Création d'un graphique avec le jeu de données NombreAggregatParAnnee
  aes(x = annee, y = NbAggregats) + # "Mapping" des valeurs : champ "annee" en x, champ "NbAggregats" en y
  geom_tufteboxplot() # Ajout d'une couche graphique de type boxplot minimaliste (Tufte boxplot)
```

pas super
lisible

(a) Code source R avec le *package* ggplot2



(b) Graphique généré

FIGURE 5.18 – Un exemple de manipulation de données stockées dans un SGBD depuis R.

Fluidifier les étapes de rendu : le « pipeline de visualisation ». DOS SANTOS et BRODLIE (2004) ont conceptualisé et schématisé l'ensemble des étapes nécessaires à la construction d'une visualisation, depuis les données brutes jusqu'à l'image finale, au sein d'un « *pipeline* » de la visualisation (figure 5.19). Ils y décrivent les différents états des données en entrée et en sortie (ligne supérieure), ainsi que les traitements que ces données subissent (ligne inférieure).

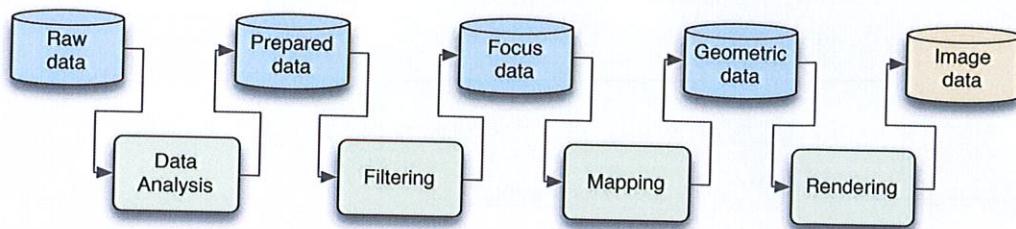


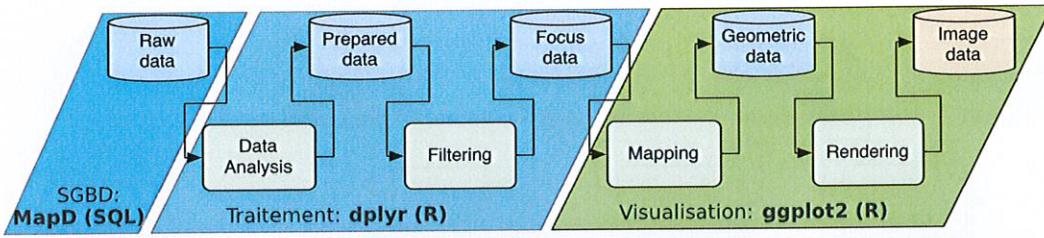
FIGURE 5.19 – « *The Visualisation Pipeline* », de KEIM et al. (2010), p.92, d'après DOS SANTOS et BRODLIE (2004), p. 314.

Ce *pipeline* débute par des données brutes (*raw data*) auxquelles ont fait suivre un traitement (*data analysis*, par exemple une agrégation) pour obtenir des données prêtes à l'utilisation (*prepared data*). Il s'agit ensuite de filtrer ces données (choix des expériences à conserver par exemple), dont l'on conserve donc uniquement les éléments nécessaires (*focus data*). Par une étape de mise en correspondance des variables et des primitives graphiques (*mapping*, voir paragraphe précédent), on obtient un jeu de données « géométriques » (*geometric data*). Cette « géométrie » est à entendre au sens de l'espace de la représentation graphique, qui comprend par exemple les coordonnées des points, lignes, la couleur des cercles et autres éléments mobilisés dans la construction d'un graphique. Il n'est donc aucunement question ici de données géographiques ou spatiales. La dernière étape est plus technique : il s'agit du « rendu graphique » (*rendering*), qui convertit un ensemble de spécifications géométriques (textuelles) en une image affichable, faite de pixels (*image data*).

Dans la chaîne de traitement la plus classique, ces étapes s'effectuent au sein de différents logiciels, chacun dédié à une tâche. Dans le domaine des utilisateurs de SIG, on retrouve par exemple fréquemment une préparation des données dans un tableur, un import dans un logiciel SIG qui va être chargé de la cartographie, puis un export vers un logiciel de dessin vectoriel afin de réaliser la mise en page. À chaque changement de logiciel, il est nécessaire d'exporter les données produites, puis de les ré-importer dans le logiciel suivant.

A contrario, le propre de l'utilisation d'un langage de programmation plutôt que d'un outil graphique est de pouvoir automatiser et intégrer l'ensemble de ces étapes. L'utilisation de R comme langage de développement de SimEDB nous permet ainsi de développer une unique chaîne de traitement, qui ne requiert aucun import/export de données, et peut donc être consolidée, vérifiée et surtout ré-employée *ad libitum*.

L'enchaînement des *packages* employées dans SimEDB est présenté dans la figure 5.20a, et le code-source correspondant à l'exemple développé dans cette sous-partie dans la figure 5.20.



(a) Technologies utilisées dans SimEDB.

```

tbl(conMapD, "agregats") %>% # Connexion à la table agregats de la BDD
filter(sim_name == "5_0") %>% # Filtre de la table en ne conservant que les expériences "5_0"
group_by(sim_name, seed, annee) %>% # Agrégation sur les identifiants de simulation (seed et sim_name) et par année
summarise(NbAgregats = n()) %>% # Calcul du nombre total de lignes pour chaque agrégation
arrange(sim_name, seed, annee) %>% # Tri de la table selon les trois variables
collect() %>% # Récupération du résultat de la requête en mémoire
mutate(annee = factor(annee)) %>% # Conversion du champ "annee" de numérique à facteur
ggplot() + # Création d'un graphique avec le jeu de données créé jusque-là
aes(x = annee, y = NbAgregats) + # "Mapping" des valeurs : champ "annee" en x, champ "NbAgregats" en y
geom_tufteboxplot() # Ajout d'une couche graphique de type boxplot minimaliste (Tufte boxplot)

```

(b) Implémentation d'un exemple de pipeline de visualisation pour construire un indicateur dans SimEDB

FIGURE 5.20 – Le « pipeline » de visualisation et son implémentation dans SimEDB. Cette implémentation est obtenue en assemblant les codes des figures 5.16a et 5.18a.

peut tu
tu la police
au moins
de 1 unité
(as-tu les yeux!)

Modulariser les fonctions. Shiny, en tant qu'outil de création d'interface graphique, bénéficie aussi d'un avantage important en matière de conception d'application web : comme ce package est basé sur un langage de programmation modulaire, on peut logiquement créer et ré-utiliser des « briques d'interfaces » modulaires. Par l'utilisation de modules⁶⁰, il est possible de définir un ensemble d'éléments graphiques adaptatifs et de ré-utiliser tel quel cet ensemble.

Dans l'interface de SimEDB (figure 5.21), par exemple, les indicateurs graphiques sont toujours présentés de la même manière (encadrés oranges) : dans la partie de droite relative aux indicateurs, l'indicateur à proprement parler est à gauche, et des outils de téléchargement (vectoriel et image) et de notation de l'indicateur (les étoiles) sont placés en haut à droite.

En termes de code-source, la manière de produire les deux indicateurs comparés dans la figure 5.21 est strictement identique : c'est une fonction générique qui prend en entrée des données et un type de graphique à produire. Dans la figure, seul un paramètre varie : le filtre appliqué aux données, qui renvoie ici à différentes expériences. Cela permet donc d'une part de minimiser la taille du code, mais surtout, avec la générnicité apportée, de faciliter de manière considérable l'ajout ou la modification d'indicateurs.

je ne suis plus QUAND tu as défini
ce qu'est une expérience pour toi...

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

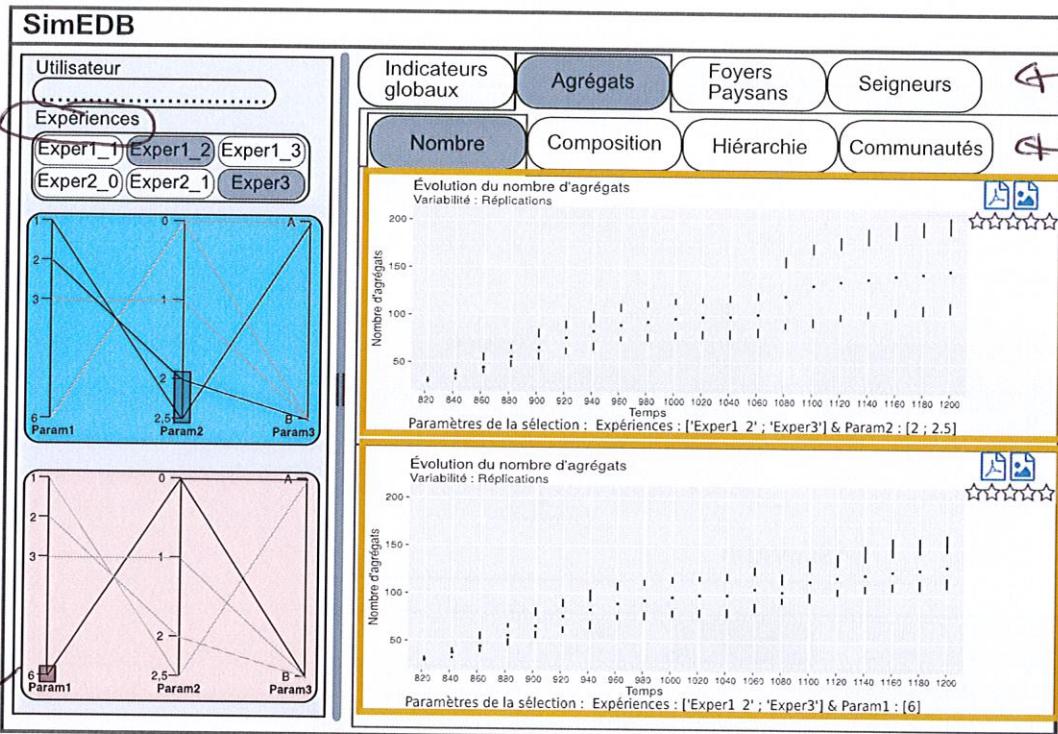


FIGURE 5.21 – Une conception modulaire. Les deux éléments graphiques encadrés sont créés par un même « module » dont les arguments varient. Ici, l’argument est constitué par les expériences sélectionnées : on le visualise dans les graphiques en coordonnées parallèles (gauche) et dans la partie inférieure des graphiques (texte « Paramètres de la sélection »).

N.B : À partir de cette figure, on représente l’interface de SimEDB à l’aide d’un *mockup* plutôt que de captures d’écrans, pour en simplifier la compréhension.

5.4.2.2 Choix de l’organisation visuelle

Les différentes étapes de construction d’une plate-forme d’exploration (section 5.2 : Comment explorer les sorties de SimFeodal ?) ont conduit à une organisation sous forme de *dashboard* interactif. La forme de ce *dashboard* a évolué tout au long de l’apparition de nouveaux besoins, pour aboutir sur une organisation mono-page, pensée autour de la consultation d’indicateurs de sorties, qui devaient permettre de comparer des expériences différentes sélectionnées au moyen de graphiques en coordonnées parallèles.

Le choix d’un outil dédié à la comparaison, plus qu’à la visualisation des résultats d’un unique ensemble de simulations, entraîne nécessairement des répercussions en matière de présentation visuelle – d’interface graphique – des éléments permettant de mener cette comparaison. Depuis la première plate-forme aboutie – SimVADB (figure 5.7, reprise ici en figure 5.22a) –, l’interface graphique a fortement évolué par conséquent (figure 5.22b).

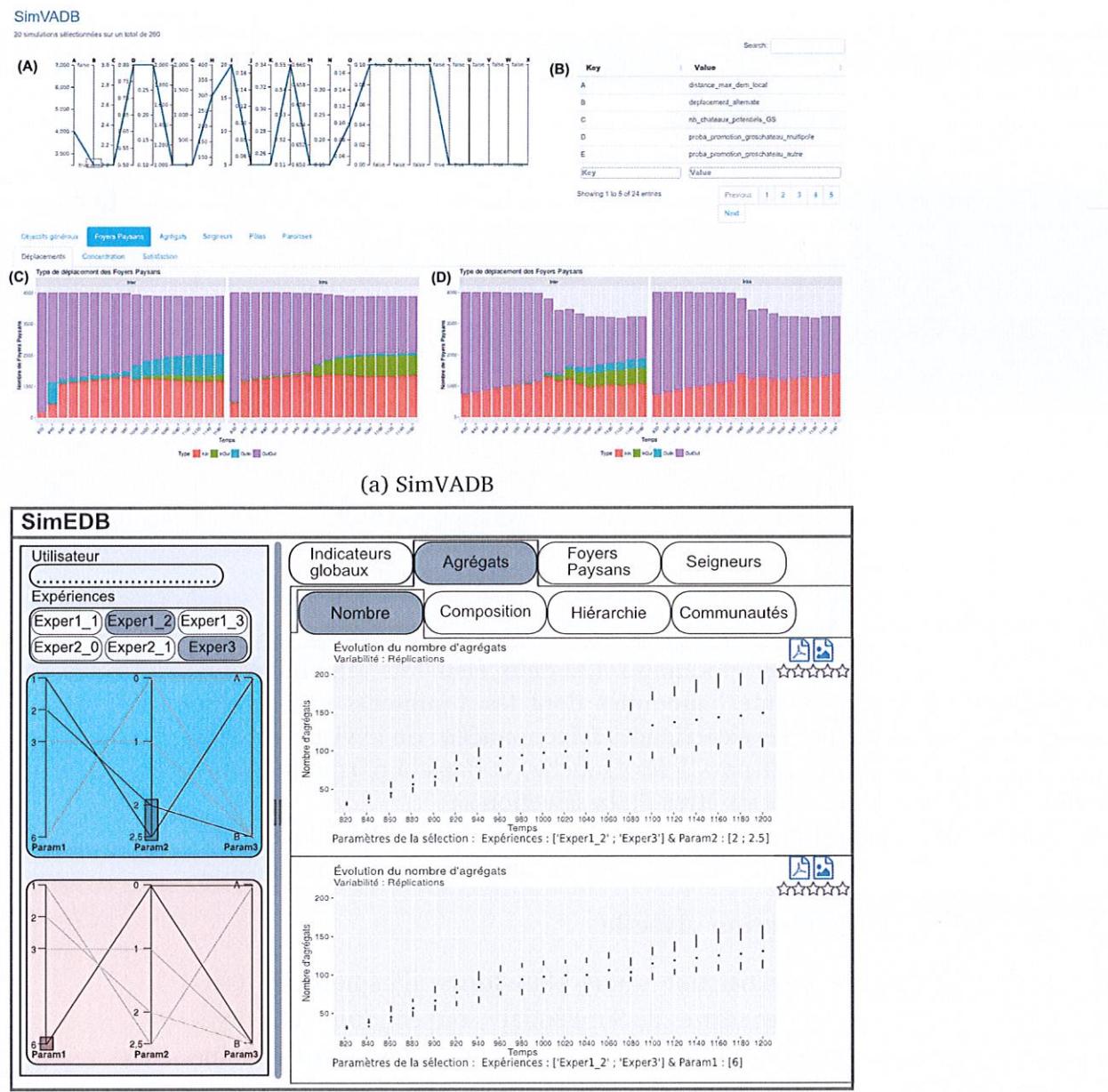


FIGURE 5.22 – Comparaison visuelle de SimVADB (a) et SimEDB (b).

Une comparaison verticale. Le premier changement tient à la disposition des « contrôleurs », c'est-à-dire aux composants de l'interface sur lesquels l'utilisateur peut jouer pour choisir les expériences qui seront affichées. Dans SimVADB, le seul contrôleur était un graphique en coordonnées parallèles interactif, situé dans le haut à gauche de l'interface (figure 5.22a, partie (A)). Celui-ci permettait de régler le choix des expériences présentées dans l'indicateur de droite (D), celui de gauche (C) étant constitué d'une moyenne de l'ensemble des expériences.

Dans SimEDB, on a déjà expliqué le choix de permettre une double sélection, c'est-à-dire de régler les deux sous-ensembles de simulation à comparer. Par conséquent, la barre des contrôleurs (encadré orange dans la figure 5.23) est désormais constitué de deux graphiques en coordonnées parallèles interactifs (en bleu et en rouge), qui agissent sur les indicateurs présentés à leur droite.

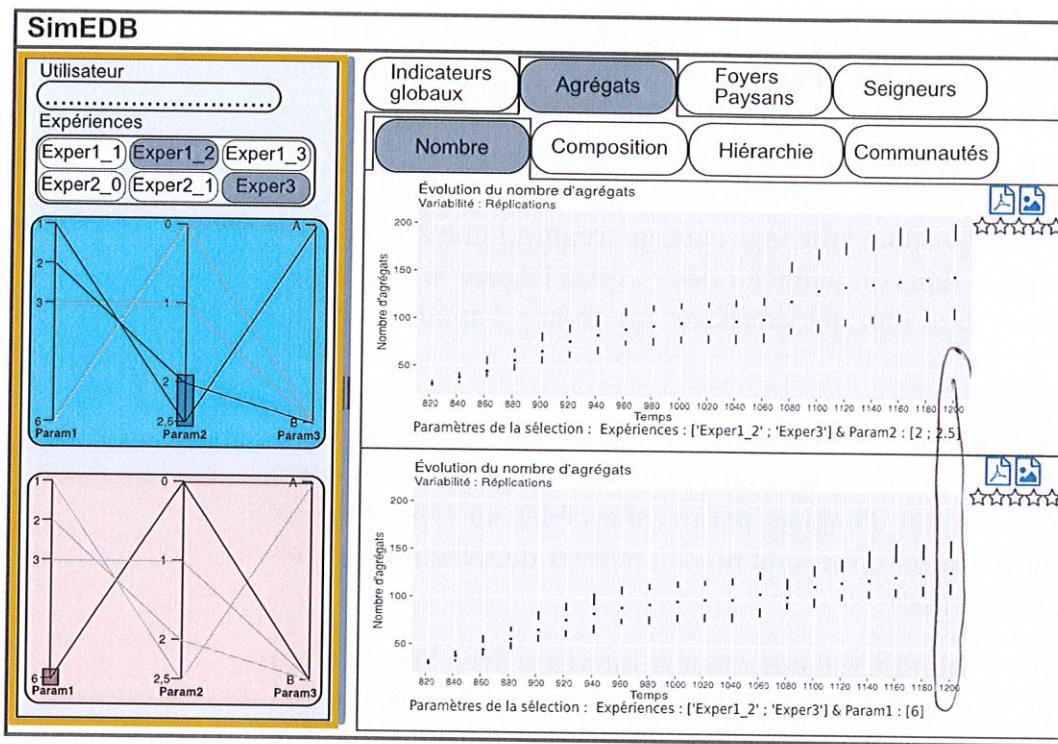


FIGURE 5.23 – La barre de contrôleurs (encadrée en orange) dans l’interface de SimEDB.

En raison de ces composants supplémentaires dans l’interface, on a choisi d’en changer la disposition. Les contrôleurs sont désormais situés à gauche et les indicateurs à droite, alors qu’ils étaient superposés dans SimVADB.

Ce choix de re-disposition tient à deux arguments. En premier lieu, en termes d’occupation de l’espace visuel on peut noter que les indicateurs graphiques sont toujours plus larges que haut. Cela s’explique notamment de manière thématique, en ce que la variation temporelle, souvent présentée en abscisse, est plus importante que les valeurs attributaires, en ordonnée : les indicateurs de ce type s’analyse plus de manière relative, en observant leur évolution, que de manière absolue. L’occupation de l’espace visuel est donc mieux employée en superposant les indicateurs : cela permet d’augmenter la taille de chacun.

La seconde raison est méthodologique. SimEDB est un outil qui sert à comparer visuellement des données de sortie de simulation. Dans les indicateurs présentés, le plus souvent, les intervalles affichés en abscisse sont constants : qu’ils s’agissent du temps, de modalités d’un indicateur (petits seigneurs, grands seigneurs...) ou encore de seuils (composition d’un agrégat en nombre de foyers paysans, discrétisée selon des seuils choisis en amont), l’axe des abscisses est identique quelles que soient les expériences comparées. L’axe des ordonnées, au contraire, est plus variable : qu’il représente une valeur absolue, un décompte ou une fréquence, les ordres de grandeur de ces valeurs sont très hétérogènes selon les expériences comparées. Le choix a donc été fait de présenter visuellement les ordres de grandeur comparables, et donc de superposer les sélections différentes (l’axe des abscisses est alors commun) plutôt que de les afficher côte-à-côte (ce qui aurait complexifié la comparaison des ordonnées en les présentant comme directement comparables alors que les ordres de grandeur varient).

Avec un axe « fixe », il est donc opportun de mener la comparaison visuelle sur cet axe, et donc d'aligner les graphiques sur celui-ci. L'organisation des différents indicateurs est donc verticale plutôt qu'horizontale. Afin que la sélection des simulations à explorer soit intuitive, les contrôleurs doivent être alignés aux indicateurs, et dès lors, verticalisés eux aussi. Pour bien différencier visuellement ce qui relève d'un affichage et ce qui requiert une interaction, les contrôleurs s'inscrivent dans un panneau dédié, grisé (figure 5.23), ce qui constitue presque un standard dans les interfaces modernes d'applications interactives.

Onglets et sous-onglets. Comme dans SimVADB (figure 5.22a), on a choisi de conserver une navigation entre indicateurs par un systèmes d'onglets imbriqués : un premier niveau d'onglets permet d'accéder au type d'agents concernés par les indicateurs, et un second niveau permet de sélectionner spécifiquement l'indicateur choisi⁶¹.

En terme de disposition, cela force l'utilisateur à interagir avec l'application régulièrement puisque chaque indicateur doit être sur un onglet dédié. La majorité des utilisateurs potentiels de SimEDB consultent toutefois l'application sur des ordinateurs portables, dotés d'écran réduits et d'une résolution faible. L'encombrement visuel est alors atteint rapidement, et mieux vaut présenter un indicateur à la fois plutôt que de présenter l'ensemble des indicateurs sur une unique page : la démarche d'étude visuelle sera plus longue, mais ne sera pas gênée ou faussée par des graphiques de dimension trop réduites qui peuvent induire des erreurs de lecture.

L'organisation des onglets en eux-mêmes pose aussi une question importante : vaut-il mieux organiser la consultation par type d'agent, ou plutôt, hiérarchiquement, selon la catégorie de processus examinée (à corriger une fois fixé sur le terme, faire ref au chap3), par exemple en respectant l'ordre de consultation des indicateurs déterminé ?

Les deux approches présentent des avantages, mais nous avons choisi de rendre l'utilisation de SimEDB plus intuitive à tous, c'est-à-dire en organisant les indicateurs par type d'agents, plutôt qu'efficace, pour les utilisateurs habitués qui auraient bénéficié d'une organisation structurée hiérarchiquement.

5.4.2.3 Choix des modes d'interactions

Avant même la conception de SimEDB, avec la plate-forme SimVADB, nous avions décidé de baser la sélection des simulations sur des graphiques en coordonnées parallèles interactifs (section 5.2.5 : « Interagir avec les rapports : exploration interactive »). La logique d'ensemble du filtrage de simulations restant la même, il n'était pas nécessaire de modifier ce choix pour SimEDB.

L'accumulation d'expériences, reposant sur les variations de paramètres diffé-

61. Notons que cette question revêt une importance réelle en matière d'ergonomie de l'application, mais que l'aspect technique en est pourtant assez simple. Pour changer le mode d'organisation des onglets et sous-onglets, il suffirait de ré-organiser les appels aux composants dans le code-source de l'application.

rents, ainsi que la démultiplication des paramètres du modèle SimFeodal ayant accompagné son paramétrage, ont pourtant demandé de reconsidérer l'usage de ces graphiques interactifs. Là où seuls quelques paramètres étaient mobilisés auparavant, les graphiques en coordonnées parallèles reposaient sur peu d'axes. Avec l'augmentation du nombre d'axes, le graphique en coordonnées parallèle est rapidement devenu illisible en raison de la surcharge graphique due au recouvrement des axes.

Yes...

Réduire la surcharge visuelle des graphiques en coordonnées parallèles.

La première mesure pour y remédier a été de filtrer les paramètres affichés : nul besoin d'afficher un axe correspondant à un paramètre qui n'est jamais manipulé dans les expériences. Plutôt que de définir les paramètres « utiles », et donc d'avoir à les redéfinir dans l'application à chaque ajout d'expérience qui reposera sur la variation d'un paramètre différent, nous avons fait en sorte que cette discrimination des paramètres « actifs » soit exécutée de manière automatique : quand SimEDB est lancé, une requête est exécutée sur la table des paramètres pour identifier ceux qui présentent plusieurs modalités et ceux qui n'en ont qu'une. Seuls sont alors affichés les paramètres de la première catégorie, car eux-seuls présentent un intérêt à être discriminés.

Ce faisant, le nombre de paramètre affichés est réduit, et permet d'afficher leurs intitulés plutôt que de faire appel à une table de correspondance comme dans SimVADB (figure 5.22a, partie (B)). L'automatisation de ce traitement permet de plus de ne pas avoir à changer quoi que ce soit à la plate-forme lors d'ajouts ou de suppressions de simulations de la base de données, ce qui concourt à l'objectif d'indépendance aux données de la plate-forme d'exploration.

man] combien max ?

Pré-filtrer les simulations. Au fur et à mesure du paramétrage puis de la calibration de SimFeodal, les expériences ont tout de même continué à mobiliser de plus en plus de paramètres différents. Pour réduire la quantité d'information représentée et améliorer en conséquence « l'expérience utilisateur », nous avons ajouté un filtre, moins visuel que les graphiques en coordonnées parallèle, qui permet toutefois de restreindre le nombre de simulations affichées à partir de leur dénomination. Plutôt que de cibler des valeurs spécifiques de paramètres, l'idée est donc de soustraire des choix possibles des expériences entières. Pour SimEDB, on a donc ajouté un pré-filtrage, sous forme de « boîte de sélection » (*select input*, figure 5.24), qui interroge la base de données directement pour connaître les différents intitulés de simulations et agit comme un premier filtre réduisant donc les simulations interrogées dans les graphiques en coordonnées parallèles.

→ et là... il faut des règles pour arriver à lire
le sens des expériences

on des requêtes sur les paramètres ?
(Paramètre)

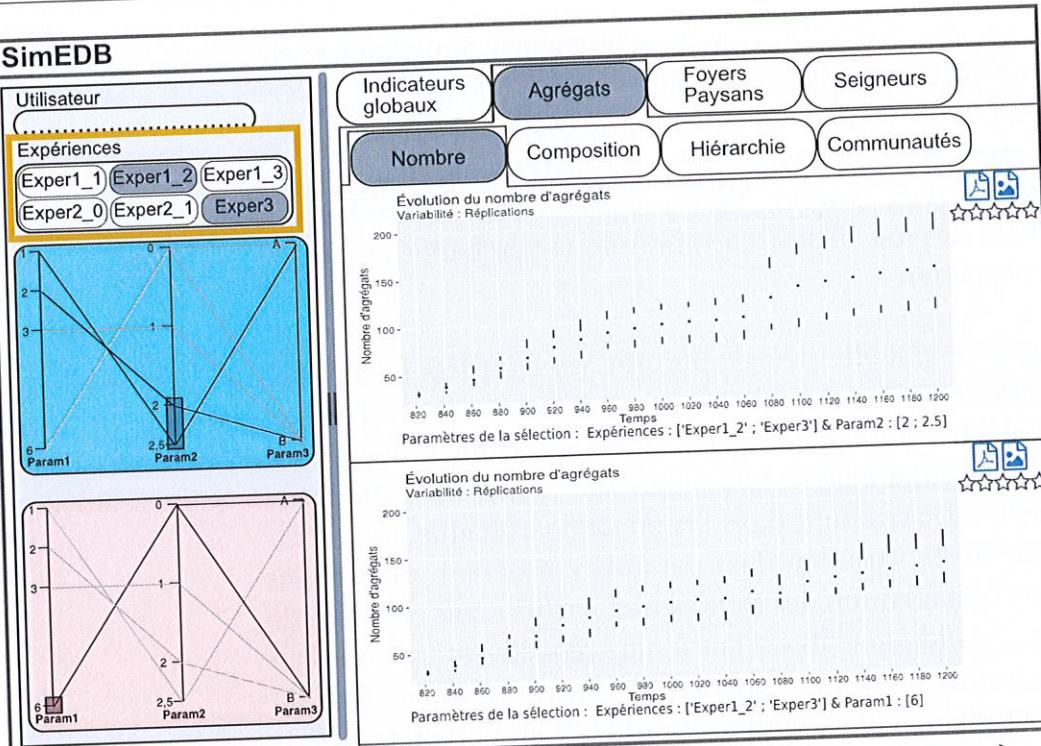


FIGURE 5.24 – Le menu de sélection des expériences (encadré en orange) qui permet un pré-filtrage des expériences à partir de leur nom.

Optimiser l'occupation de l'espace visuel. En dépit de ces différentes techniques visant à minimiser le nombre d'axes affichées dans les graphiques en coordonnées parallèles, la place prise par ces graphiques reste importante, en particulier quand on décide de ne pas diminuer la taille des éléments de légende afin de conserver leur lisibilité. Quand l'application est consultée sur un écran de taille faible, l'appréhension de l'ensemble des informations présentes dans l'interface pose ainsi un véritable problème.

En réfléchissant aux séquences d'usages, par les utilisateurs, de SimEDB, on a pu comprendre que le mode d'utilisation le plus classique était de bien considérer le filtrage à effectuer sur les graphiques en coordonnées parallèles, en y consacrant un temps certain, avant de comparer longuement les différents indicateurs de la sélection. Il n'est donc que rarement fait usage de multiples filtres successifs sur un seul indicateur, dans une approche plus exploratoire donc, mais plutôt d'évaluations complètes de simulations choisies.

Il n'est alors plus indispensable de consacrer une part importante de l'espace aux zones interactives (le panneau de contrôle), ou du moins, pas pendant l'ensemble de la période d'évaluation des simulations.

Un outil de redimensionnement a alors été ajouté à SimEDB, permettant, par glisser-déposer, de modifier la largeur occupée par le panneau de contrôle en l'adaptant à chaque moment au besoin de visualisation. La figure 5.25 montre ainsi une succession d'états : en début d'exploration, l'utilisateur va augmenter la taille du panneau de contrôle pour augmenter la lisibilité des graphiques en coordonnées parallèles et effectuer une sélection plus simplement. Une fois la sélection effectuée, il pourra alors re-diminuer la largeur du panneau afin d'augmenter la zone disponible pour les indicateurs de sorties de simulation,

et donc la taille de ces derniers.

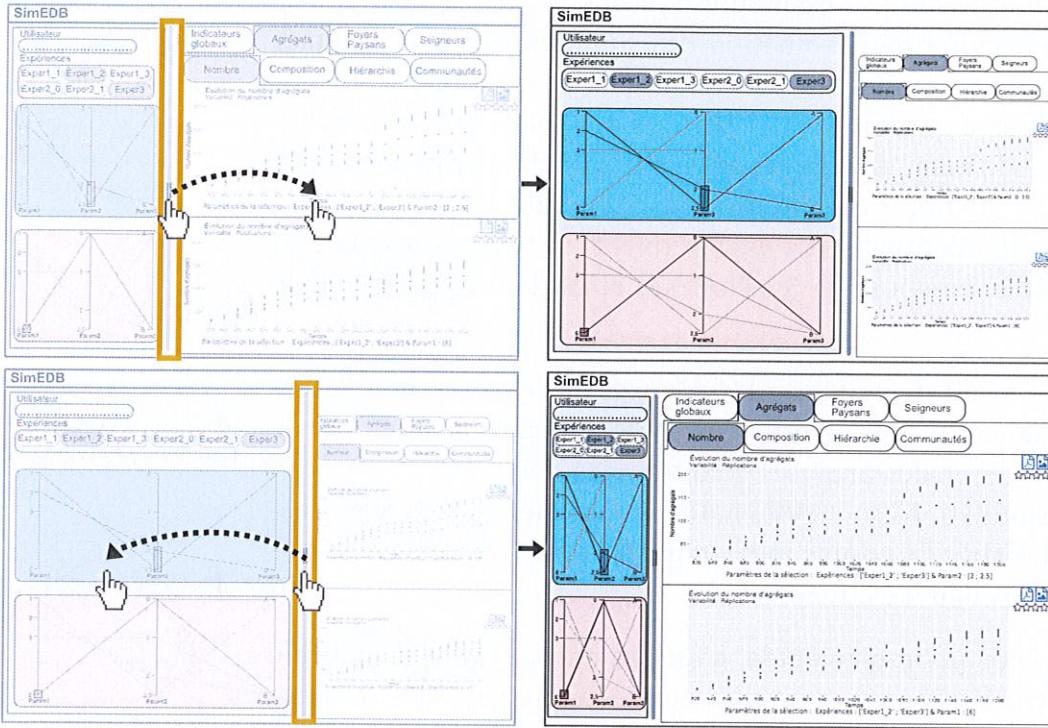


FIGURE 5.25 – Utilisation interactive de SimEDB et redimensionnement du panneau de contrôle.

Répondre aux demandes des utilisateurs : ajout d'un mécanisme d'export des indicateurs. L'intérêt d'une interface modulaire et factorisée se révèle véritablement quand les utilisateurs d'un outil demandent des fonctionnalités supplémentaires, non prévues lors de la conception de l'outil. Dans le cas de SimFeodal, une telle requête est rapidement apparue : les thématiciens, mais aussi les modélisateurs, pour conserver une trace d'une session d'exploration des indicateurs, souhaitaient pouvoir exporter les graphiques correspondant aux indicateurs.

Si au départ, une simple capture d'écran pouvait suffire, ce besoin a été complété par une volonté d'inclure des indicateurs de simulations dans des articles et autres communications, requérant donc des retouches des graphiques. Pour ce faire, on a choisi d'ajouter des fonctionnalités de téléchargement des graphiques, selon deux formats – image et vectoriel – afin de satisfaire à ces deux usages. Avec le développement modulaire adopté, il a suffit d'ajouter ces fonctions d'export en un unique lieu dans le code-source de SimEDB, et l'ajout de ces nouvelles fonctionnalités a alors été disponible automatiquement pour chacun des indicateurs graphiques.

Un autre élément répond à une demande forte des utilisateurs : dans une réutilisation hors application des indicateurs, il était difficile de se souvenir des sélections effectuées pour produire un indicateur : en terme de reproductibilité, une fois un graphique exporté sur un ordinateur, il n'y avait plus aucun moyen de connaître les conditions précises de sa création. Nous avons donc ajouté, sur les graphiques eux-mêmes, un résumé des expériences et valeurs de paramètres sélectionnées dans chacun des indicateurs. Cela permet d'en conserver une trace plus durable et augmente leur potentiel réutilisation.

Ah!

Noter les simulations. Un dernier point d'interaction avec l'application a été prévu, sans pouvoir toutefois être mobilisé jusque là : il s'agissait d'aller vers une semi-automatisation de l'évaluation des simulations, par l'intermédiaire d'un outil graphique permettant de « noter » les simulations sélectionnées. Pour ce faire, et parce que, on l'a vu, l'évaluation d'un ensemble de simulations ne peut se faire de manière unique, on a choisi de donner la possibilité aux utilisateurs experts de noter chacun des indicateurs de sortie, pour chaque ensemble de simulations qu'ils explorereraient. L'évaluation se fait au moyen d'un outil simple, composé de 5 « étoiles », et est enregistré à chaque nouvelle note.

*Noter**ou**Annoter ??**Noter**&**Annoter,*

Une piste d'utilisation serait de mobiliser les données ainsi créées, composées d'une note donnée à un indicateur pour un ensemble d'identifiants uniques de simulations, afin de réaliser des analyses quantitatives des notes attribuées : est-ce que certaines simulations sont systématiquement bien notées avec chacun des indicateurs affichés ? Certains indicateurs ne sont-ils jamais observés ou ne donnent-ils jamais lieu à évaluation ?

Cette fonctionnalité, bien qu'implémentée, n'est pas encore utilisée, mais devrait à terme permettre d'aller vers une meilleure connaissance des résultats de simulation, tout autant que vers une mesure de l'efficacité des indicateurs de sortie choisis pour évaluer un ensemble de simulations.

5.4.2.4 Présentation générale

SimEDB est une application interactive. Il nous semblait dommage d'en présenter l'utilisation d'ensemble par une succession de captures d'écran commentées. Nous avons donc réalisé une vidéo qui en montre l'usage et est disponible à cette adresse : **A faire...**

Il me tarde de la regarder !