

## Construction et évaluation d'un modèle de simulation dans un contexte interdisciplinaire.

**Le modèle « Fixation et polarisation de l'habitat en Europe du Nord-Ouest entre 800 et 1100 ».**

**Robin Cura<sup>1</sup>, Cécile Tannier UMR ThéMA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> UMR Géographie-cités Université Paris 1

<sup>2</sup> UMR ThéMA CNRS-Université de Franche-Comté

**Mots-clefs** - Modélisation à base d'agents ; Paramétrage ; Exploration visuelle ; Données spatio-temporelles

### Contexte et objectifs

#### 0.0.1 Contexte de l'étude

Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre de l'ANR TransMonDyn, qui vise à étudier les transformations dans les systèmes de peuplement sur le temps long, au moyen de modèles conceptuels ou implémentés sous forme informatique. Cette étude s'appuie sur un formalisme, développé au sein du projet, définissant la transformation comme une transition entre un régime 1 et un régime 2. Le projet TransMonDyn repose sur l'analyse d'un ensemble de douze cas d'études empiriques, les transitions, dont les localisations autant que les échelles spatiales et temporelles sont extrêmement diverses.

Notre groupe de travail étudie l'une de ces transitions, intitulée « Transition 8 - 800- 1100 : fixation et polarisation de l'habitat en Europe du Nord-Ouest ». Dans un contexte interdisciplinaire, le groupe étant constitué d'archéologues et d'historiens (Julie Gravier, Samuel Leturcq, Elisabeth Lorans, Xavier Rodier et Elisabeth Zadora-Rio), ainsi que de géographes (Robin Cura, Lucie Nahassia et Cécile Tannier), nous cherchons à caractériser et à modéliser l'émergence d'une structure de peuplement stable (de 1100 à la Révolution française), polarisée autour de châteaux et d'églises. Notre hypothèse est que ce régime

est issu de processus génériques d'émission des pouvoirs des seigneurs, aussi bien laïcs qu'ecclésiastiques, qui, simultanément à des logiques de concurrence ou de complémentarité seigneuriales, ont conduit à la formation d'un maillage territorial paroissial et seigneurial et à une polarisation de l'habitat autour des lieux de pouvoirs (églises, châteaux). Cette polarisation, ainsi que la hiérarchisation résultante des systèmes de peuplement régionaux durant la période, sont cependant bien différentes selon les régions de l'Europe du Nord-Ouest.

### Objectifs

Nous avons choisi d'éprouver cette hypothèse par la réalisation d'un modèle de simulation. Dans un premier temps, le groupe a développé un modèle conceptuel (Tannier et al. 2014) identifiant les entités (élémentaires, mésoscopiques et macroscopiques) spatiales (unités d'exploitations paysannes, villes. . .) ou sociales (communautés agraires, siège épiscopal. . .), ainsi que les relations entre celles-ci (par exemple, la communauté agricole attire les foyers paysans).

Une fois ce modèle conceptuel construit, nous avons pu procéder à son implémentation sous forme d'un modèle à base d'agents. La construction de celui-ci résulte d'un processus de collaboration, entre les experts de la thématique (archéologues et

historiens) et les modélisateurs géographes. L'étape suivante, qui constitue dès lors l'objectif principal de la démarche présentée ici, est de paramétrer ce modèle. Si les mécanismes implémentés ont été pensés collectivement, il reste à trouver des jeux de paramètres, empiriques autant que « de fonctionnement », permettant de simuler l'émergence de dynamiques de polarisation et de hiérarchisation des systèmes de peuplement régionaux qui soient réalistes. Pour cela, dans un premier temps, nous avons choisi de prendre comme cas d'étude une unique région, la Touraine, en ce qu'elle est particulièrement connue des archéologues du groupe (Zadora-Rio 2008) qui disposent de différents indicateurs quantitatifs permettant une comparaison entre dynamiques observées et simulées. Dans un second temps, on cherchera à reproduire des scénarios, c'est-à-dire qu'en modifiant certains paramètres, on doit pouvoir simuler des dynamiques de systèmes de peuplements différentes, correspondant à ce qui a pu être observé dans d'autres régions de l'Europe du Nord-Ouest.

Afin de permettre ce travail collectif de paramétrage, il est nécessaire que les archéologues aient accès à une synthèse, aussi claire que possible, des résultats de simulation sous la forme d'indicateurs, de graphiques et de cartes. Nous avons pour cela choisi de développer une plate-forme d'exploration visuelle de données, interface pour que le dialogue interdisciplinaire puisse avoir lieu autour d'informations synthétiques, graphiques et surtout partagées, ceci afin de permettre une réelle co-construction du modèle et de son paramétrage.

Nous présenterons ici les modalités de la construction collaborative d'un modèle de simulation, et en particulier du processus de premier paramétrage, autour d'une plate-forme logicielle développée à cet usage.

## Le modèle de simulation

Le modèle<sup>3</sup> a été développé avec la plateforme de modélisation agent GAMA (Grignard et al. 2013), à la fois en raison de la gestion avancée de données géographiques qu'elle propose, et du langage de développement employé (GAMA Modeling Language), lequel utilise un formalisme « comportemental » (les agents agissent selon des réflexes) facilitant l'expression et la compréhension de règles pour les moins initiés à la modélisation agent.

Le modèle anime, dans un espace théorique de 100 × 100 km, un ensemble d'agents de différents types :

- Des **foyers paysans**, marqueurs de la transition. Ceux-ci sont caractérisés par un ensemble de mesures de satisfactions (Matérielle, Religieuse, et en terme de Protection face aux violences), qui les poussent à se déplacer lorsque celles-ci sont trop faibles. Ces déplacements s'effectuent selon des modalités particulières selon les situations, mais visent systématiquement à l'augmentation de la satisfaction, selon une logique découlant des modèles gravitaires.
- Lorsque les foyers paysans se regroupent, ils peuvent former des **agrégats** de population, correspondant à des villages ou à des villes, qui peuvent être dotés de fonctions (marchés, foires, communautés agraires. . .) renforçant leur capacité d'attraction.
- Les **seigneurs** laïques ou ecclésiastiques constituent les agents initiant les transformations spatiales (majoritairement observées au niveau des foyers paysans, selon la distribution de ceux-ci) : ils collectent des redevances auprès des foyers paysans, construisent des **églises** et des **châteaux**, et, dans un processus d'émiettement des pouvoirs, se cèdent les uns aux autres, contre rétribution sous forme de puissance et d'obligation, une partie des droits qu'ils possèdent.

3. Code-source disponible à cette adresse : <https://github.com/RCura/transition8>

Tout au long de la simulation (exécutée sur 18 pas de temps de 30 ans), des foyers paysans disparaissent et apparaissent – ce qui complexifie le suivi de leurs trajectoires spatio-temporelles –, des châteaux sont construits – renforçant le prélèvement de rede-vances – et des églises sont érigées et détruites, en fonction des droits paroissiaux qu’elles se sont vu – ou non – accorder et du nombre de foyers paysans qu’elles desservent.

Le modèle s’inscrit dans une approche plutôt « Keep It Descriptive, Simple » (KIDS – Edmonds et Moss 2005), et, pour être en mesure de reproduire les scénarios très divers rencontrés selon les régions considérées, possède un nombre important de paramètres. En effet, on souhaite pouvoir par exemple modifier le comportement des seigneurs les uns envers les autres (accentuation ou diminution de la coopération ou de la concurrence entre eux), ajuster la portée défensive des châteaux, ou encore faire varier l’impact des marchés et foires dans le choix de déplacement d’un foyer paysan. Par exemple, si la Touraine de cette époque voyait deux grands seigneurs s’affronter, et développer pour cela une forte lignée de seigneurs vassaux, d’autres régions, par exemple en montagne, n’étaient dominées que par un unique grand seigneur, et les communautés agraires représentaient un contre-pouvoir plus important.

## Paramétrage

L’enjeu du paramétrage est de trouver un ensemble de valeurs de paramètres permettant la reproduction des dynamiques observées dans une région donnée, le modèle et son paramétrage devenant dès lors candidat à l’explication de ces dynamiques. Ces paramètres peuvent être classés en trois catégories, décroissantes dans les connaissances empiriques que l’on en a :

- Les paramètres empiriques et fixés a priori. Ils ne sont pas amenés à être calibrés et relèvent de connaissances empiriques sur le domaine. Par exemple, le

nombre de grands seigneurs dans un scénario ou le nombre initial d’agrégats de foyers paysans.

- Les paramètres de calibrage. Ils s’inscrivent aussi dans une connaissance empirique, mais celle-ci est plus vague, et basée sur des généralités. L’espacement moyen des châteaux ou encore le nombre d’églises en sont des exemples. On ne peut les fixer a priori, mais leur variation ou leur état final au cours d’une simulation permet de juger de leur validité.
- Les paramètres à explorer. On ne dispose pour ceux-ci dans le meilleur des cas que de vagues ordres de grandeur. Ce sont les paramètres amenés à être les plus modifiés au cours du paramétrage. Leur paramétrage doit permettre de faire correspondre paramètres empiriques et de calibrage. Il s’agit par exemple du taux moyen de prélèvement de redevances par les seigneurs, de la propension des seigneurs à collaborer, ou encore du niveau de violence (et donc du besoin de protection) existant dans un système de peuplement.

La complexité du système en jeu, et dès lors la multiplicité des points de vue nécessaires à son analyse, implique un aller-retour constant entre les paramètres de simulation et les résultats obtenus. Le modèle, médiateur, peut servir de « catalyseur de collaborations disciplinaires et interdisciplinaires » (Banos 2013), si tant est que son comportement ne soit pas compris uniquement par les seuls modélisateurs, et il en va de même pour son exploration. Dans ce cadre, le paramétrage nécessite un échange en temps réel entre les archéologues et les modélisateurs, et il faut disposer d’un outil adapté au modèle – pour accélérer l’exploration et donc fluidifier le processus – et flexible – afin de pouvoir multiplier les angles d’analyse et s’attacher à chacun des aspects du modèle.

## Méthodes : exploration visuelle des sorties du modèle

Afin de trouver un paramétrage du modèle pour lequel les sorties correspondent à une situation observée, il est nécessaire d'explorer l'espace des paramètres. Des méthodes quasi-automatisées existent pour cela (Reuillon et al. 2013), mais elles sont peu adaptées aux modèles comportant un grand nombre de paramètres, et reposent sur l'exécution d'une quantité très importante de simulations (jusqu'à des centaines de millions, Schmitt et al. 2014). Ces méthodes ne permettent pas de mener une exploration de paramètres dépendants les uns des autres, ce qui est pourtant nécessaire dans notre cas : certains paramètres de notre modèle doivent en effet conserver des valeurs conditionnées par d'autres (un rayon d'attraction maximum, par exemple, devra toujours être supérieur au rayon minimum). Il existe d'autres méthodes de calibration, moins automatiques, adaptées aux modèles KIDS et capables de gérer la dépendance des paramètres (Hirtzel 2015). Ces méthodes font toutefois là aussi appel à un large volume de simulations, empêchant donc un paramétrage en temps réel. Qui plus est, la démarche de paramétrage dans laquelle nous nous inscrivons ne consiste pas en une exploration complète de l'espace des paramètres, mais vise plutôt à trouver un ensemble cohérent de paramètres permettant la reproduction des dynamiques observées dans une région donnée. L'exploration du modèle ne peut donc se faire de manière automatisée, et ne peut non plus être réalisée sur un grand nombre de simulations : l'objectif est d'être réactif aux demandes et questionnements des archéologues, en temps réel. Cette exploration se réalisera donc autour d'une plate-forme d'exploration visuelle, s'inspirant des méthodes et concepts développés dans le champ des GeoVisual Analytics (Andrienko et al. 2003 ; Andrienko et al. 2014).

Dans ce domaine, il n'y a encore que très peu d'outils dédiés à l'analyse de sorties de simulations, et les rares outils existants sont conçus pour une analyse a posteriori

d'un grand nombre de simulations (voir par exemple Cura et al. 2014 ; Mahboubi et al. 2011) plutôt que pour de l'analyse en temps réel, chaque simulation devant, dans notre cas, être l'occasion de changer le paramétrage et ainsi d'approcher d'un état plus calibré.

Précisons ici que la conception de cette plate-forme d'exploration visuelle s'inscrit dans le temps, plus long, d'une thèse. Elle est conçue de manière générique, afin de pouvoir s'adapter à différents modèles de simulation.

Le projet ici présenté sera l'occasion d'en initier le développement, lequel avancera au rythme des phases de paramétrage du modèle, garantissant ainsi l'obtention d'un outil flexible et répondant aux attentes de ses utilisateurs.

## Résultats attendus

### Dans le cadre de cette communication

Cette étude aura des résultats dans les différents champs auxquels elle se rattache. En premier lieu, sur le plan thématique, l'obtention d'un premier paramétrage du modèle sur la Touraine permettra d'explorer en quoi les jeux de pouvoir des seigneurs a influencé la polarisation et la hiérarchisation du système de peuplement dans cette région. Sur un plan plus conceptuel, l'étude qui est présentée ici est un cas d'application de modélisation dans un contexte interdisciplinaire, et à ce titre, le retour d'expérience qui en découlera ne peut qu'être enrichissant.

### Sur le long terme

Cette communication s'inscrit aussi dans deux temporalités plus longues : celle de la collaboration interdisciplinaire autour de la modélisation de la transition 800-1100 et celle de la thèse dont elle constitue une partie. Dans le premier cas, la définition d'un premier jeu de paramètres ouvre la

voie à une exploration plus complète et systématique des comportements du modèle, dans l'objectif de procéder à sa « validation externe » (Amblard et Phan 2006). Dans le deuxième cas, le développement d'une plate-forme adaptée à l'exploration de données de simulation et éprouvée sur plusieurs modèles dotera la communauté des modélisateurs d'un nouvel outil pour faciliter une démarche souvent nécessaire de calibration et d'exploration « agile » des modèles.

Le développement conjoint du modèle et de

la plate-forme permettront ainsi de mener de manière interactive les analyses de sensibilité et de stabilité du modèle de la transition 800-1100, ouvrant alors la possibilité de modéliser les scénarios correspondant aux autres régions, d'intégrer de nouveaux comportements particuliers au modèle, et ce faisant, d'augmenter le caractère générique de la plate-forme d'exploration visuelle des résultats de simulation, avec l'objectif escompté de l'utiliser pour explorer le comportement d'autres modèles du projet TransMonDyn.

## Références

Amblard, Frédéric et Denis Phan (2006). *Modélisation et simulation multi-agents*. science informatique et SHS. Hermes Lavoisier. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00105760>.

Andrienko, Gennady, Natalia Andrienko, Jason Dykes, Menno-Jan Kraak et Heidrun Schumann (2014). « GeoVisual analytics, time to focus on time ». In : 13.3, p. 187–189. url : <http://ivi.sagepub.com/content/13/3/187>.

Andrienko, Natalia, Gennady Andrienko et Peter Gatalaky (2003). « Exploratory spatio-temporal visualization : an analytical review ». In : Visual Data Mining 14.6, p. 503–541. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1045926X03000466>.

Banos, Arnaud (2013). « Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en Géographie et SHS ». Habilitation à Diriger des Recherches. Paris : Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. 107 p. url : <http://arnaudbanos.perso.neuf.fr/hdr/volume-banos.pdf>.

Cura, Robin, Mehdi Boukhechba, Hélène Mathian, Florent Le Néchet et Lena Sanders (2014). « VisuAgent – Un environnement d'exploration visuelle de données spatio-temporelles issues de simulation ».

SAGEO 2014, Atelier Démo. Grenoble. url : <http://rcura.github.io/VisuAgent/>.

Edmonds, Bruce et Scott Moss (2005). « From KISS to KIDS – An 'Anti-simplistic' Modelling Approach ». In : *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation*. Sous la dir. de Paul Davidsson, Brian Logan et Keiki Takadama. Lecture Notes in Computer Science 3415. Springer Berlin Heidelberg, p. 130–144. url : [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-32243-6\\_11](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-32243-6_11).

Grignard, Arnaud, Patrick Taillandier, Benoît Gaudou, Duc An Vo, Nghi Quang Huynh et Alexis Drogoul (2013). « GAMA 1.6 : Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation ». In : PRIMA 2013 : *Principles and Practice of Multi-Agent Systems*. Sous la dir. de Guido Boella et al.. Lecture Notes in Computer Science 8291. Springer Berlin Heidelberg, p. 117–131. url : [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-44927-7\\_9](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-44927-7_9).

Hirtzel, Joanne (2015). « Exploration prospective des mobilités résidentielles dans une agglomération urbaine au moyen d'un modèle de simulation multi-agents (MobiSim) ». Thèse de doct. Université de France-Comté. 478 p.

Mahboubi, Hadj, Sandro Bimonte et Guillaume Deffuant (2011). « Analyzing Demographic and Economic Simulation Model Results : A Semi-automatic Spatial OLAP Approach ». In : Computational



Science and Its Applications - ICCSA 2011. Sous la dir. de Beniamino et al. Murgante. Lecture Notes in *Computer Science* 6782. Springer Berlin Heidelberg, p. 17–31. url : [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-21928-3\\_2](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-21928-3_2).

Reuillon, Romain, Mathieu Leclaire et Sebastien Rey-Coyrehourcq (2013). « Open- MOLE, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models ». In : *Future Generation Computer Systems* 29.8, p. 1981–1990. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13001027>.

Schmitt, Clara, Sébastien Rey-Coyrehourcq, Romain Reuillon et Denise Pumain (2014). « Half a billion simulations : evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the SimpopLocal geographical model ». In :

*Environment and Planning B : Planning and Design advance* online publication. url : <http://www.openmole.org/files/Schmitt2014.pdf>.

Tannier, Cécile, Elisabeth Zadora-Rio, Samuel Leturcq, Xavier Rodier et Elisabeth Lorans (2014). « Une ontologie pour décrire les transformations du système de peuplement européen entre 800 et 1100 ». In : *Ontologies et modélisation par SMA en SHS*. Sous la dir. de Denis Phan. Hermès - Lavoisier, p. 289–310. url : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01021976>.

Zadora-Rio, Elisabeth (2008). *Des paroisses de Touraine aux communes d'Indre-et-Loire : la formation des territoires*. 34e Supplément à la Revue Archéologique du Centre de la France, Tours. FERACF. 302 p. url : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00378136>.