

ANR Transmondyn, Tours, 29 octobre 2014

Processus à l'origine de la fixation et de la polarisation de l'habitat entre 800 et 1100

Exploration au moyen de simulations multi-agents

Robin Cura, Cécile Tannier, Elisabeth Zadora-Rio, Samuel Leturcq,
Xavier Rodier, Elisabeth Lorans, Julie Gravier, Lucie Nahassia

Ce diaporama présente un travail en cours, dont l'objectif est de simuler, au moyen d'un système multi-agent, la dynamique spatiale du système de peuplement de l'Europe du Nord-Ouest sur une période de trois siècles, entre 800 et 1100.

Rappel de la transition

Sur une période de trois siècles (800-1100) :
double phénomène de polarisation et de fixation de l'habitat

Moteur de cette transition :
développement du double maillage de la seigneurie et de la
paroisse

En 800, le système de peuplement observé à une échelle régionale était composé d'un semis de petits villages et d'unités d'exploitation isolées. Tant les unités d'exploitation isolées que les villages étaient peu pérennes. Les villes qui existaient en l'an 800 étaient des chefs-lieux de cité hérités de l'Antiquité. Elles avaient une fonction essentiellement ecclésiastique en tant que siège épiscopal. Leur rôle sur le plan économique et administratif était relativement peu important.

Au cours de la période étudiée, les villages se sont fixés autour des églises ou des châteaux qui apparaissent en nombre durant cette période. Les villes existant en 800 ont connu un fort développement : de nouveaux noyaux d'habitat ont émergé autour de monastères créés durant la période. L'armature urbaine est en outre renforcée par l'émergence de nouvelles petites villes.

Cette configuration spatiale du système de peuplement observée à la fin de la période étudiée s'est maintenue jusqu'à la Révolution française.

Cheminement méthodologique

- **Entretiens semi-directifs selon une grille de lecture géographique multi-échelle**

La première étape du travail de modélisation de cette transition a été d'identifier et de décrire les entités spatiales impliquées dans celle-ci. Ceci a été fait via l'utilisation d'une grille de lecture géographique, centrée sur l'observation de processus de concurrence et de complémentarité, de polarisation et de différenciation entre des objets spatiaux.

Cette grille de lecture permet d'observer un système de peuplement selon trois niveaux d'analyse emboîtés :

- entités élémentaires : individus, ménages, familles ;
- entités mésoscopiques : chaque unité de peuplement (village, ville)
- entité macroscopique : le système de peuplement dans son ensemble.

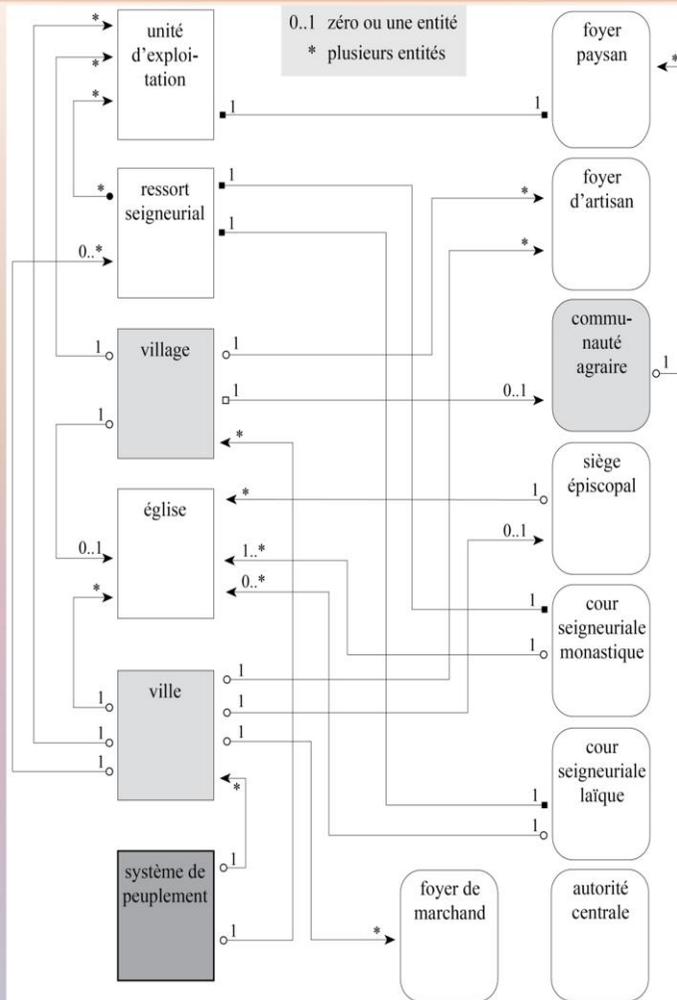
Cheminement méthodologique

- Entretiens semi-directifs selon une grille de lecture géographique multi-échelle
- **Définition des entités sociales et spatiales impliquées dans la transition** : foyers paysans, seigneurs laïcs et ecclésiastiques, siège épiscopal, autorité centrale – églises, châteaux, prieurés – communautés agraires, agglomérations (villages, villes)

La définition des entités impliquées dans la transition a nécessité d'ajouter à la grille de lecture géographique une distinction entre entités sociales et entités spatiales.

Définition des entités

Étape intermédiaire



Nature des relations

- — ■ composition : si une des entités disparaît, l'autre entité disparaît aussi
- —> dépendance : l'entité de destination ne peut exister sans l'entité de départ
- —> inclusion : l'entité de départ contient/possède l'entité d'arrivée
- —> intersection : l'entité de départ recouvre tout ou partie de l'entité d'arrivée

Cette figure représente les entités et leurs relations structurelles. Les entités élémentaires sont figurées avec un fond blanc ; les entités agrégées de niveau mésoscopique, avec un fond gris clair ; les entités agrégées de niveau macroscopique, avec un fond gris foncé.

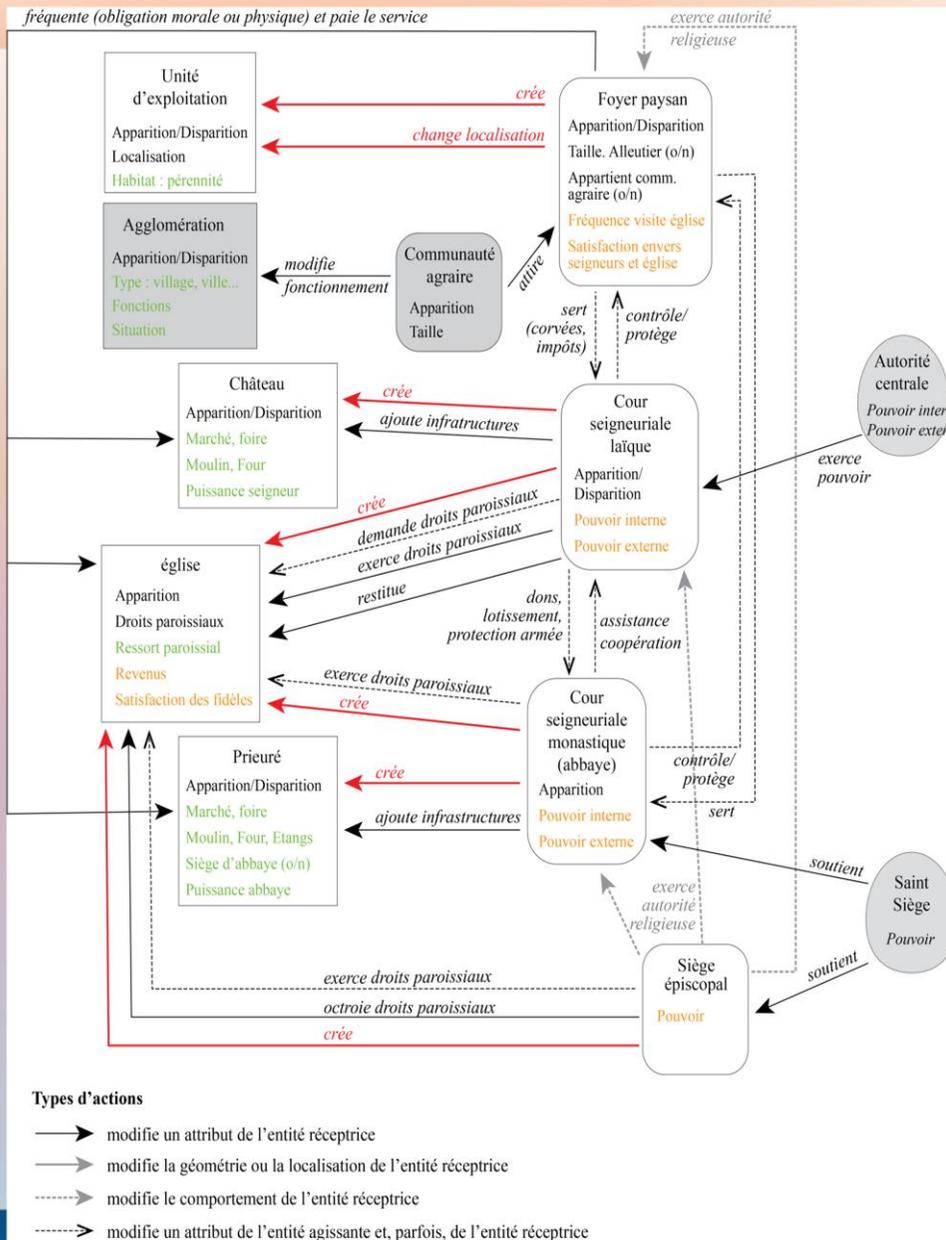
Rappelons ici que seuls les éléments qui influent directement sur la dynamique spatiale du système de peuplement sont pris en compte. Certains phénomènes marquants du haut Moyen Âge, par exemple les invasions des Vikings, ne sont de ce fait pas mentionnés

Cheminement méthodologique

- Entretiens semi-directifs selon une grille de lecture géographique multi-échelle
- **Définition des entités sociales et spatiales impliquées dans la transition** : foyers paysans, seigneurs laïcs et ecclésiastiques, siège épiscopal, autorité centrale – églises, châteaux, prieurés – communautés agraires, agglomérations (villages, villes)
- **Modélisation sous forme de schémas** : diagrammes sagittaux, diagrammes entités-relations

D'autres formes de représentations graphiques nous ont permis de multiplier les points de vue sur la transition, et ainsi, de mieux identifier les processus à l'œuvre.

Actions des entités



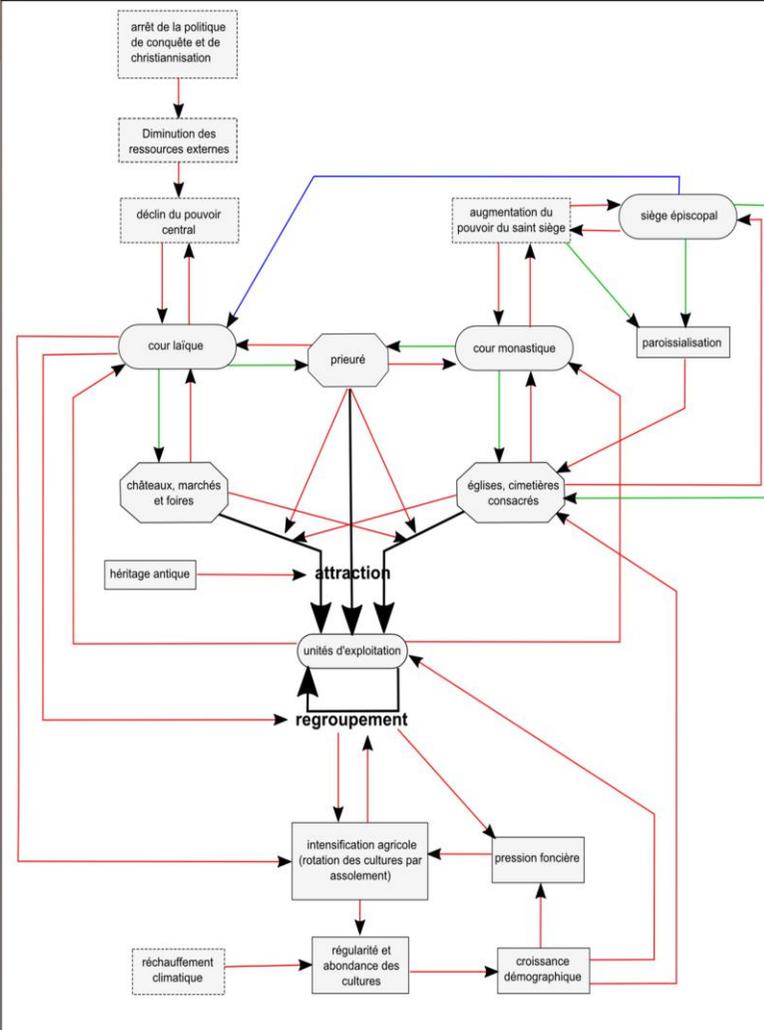
Par exemple, cette figure décrit les actions effectuées par chaque entité, ainsi que les attributs de chacune qui changent au cours de la période et dont le changement amène (directement ou indirectement) une modification de la configuration spatiale du peuplement.

En orange sont représentés les attributs des entités sociales qui évoluent au cours de la transition.

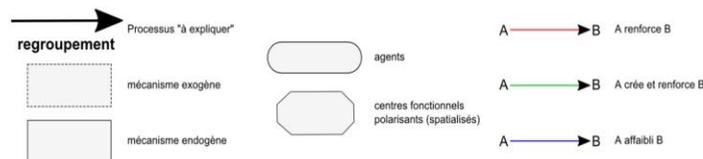
En rouge sont représentées les actions des entités sociales qui amènent directement à la création ou au déplacement d'une entité spatiale élémentaire.

En vert sont représentées les modifications des attributs des entités spatiales résultant des actions des entités sociales.

Interactions



Légende :



Cette autre figure décrit de manière systémique les relations entre les éléments qui aboutissent à un regroupement en villages des unités d'exploitation agricoles.

Cheminement méthodologique

- **Entretiens semi-directifs selon une grille de lecture géographique multi-échelle**
- **Définition des entités sociales et spatiales impliquées dans la transition** : foyers paysans, seigneurs laïcs et ecclésiastiques, siège épiscopal, autorité centrale – églises, châteaux, prieurés – communautés agraires, agglomérations (villages, villes)
- **Modélisation sous forme de schémas** : diagrammes sagittaux, diagrammes entités-relations
- **Identification de faits stylisés** : règles de comportement des entités sociales et spatiales

La définition de règles de comportement des entités a été la dernière étape avant le développement informatique du modèle.

Entité agissante <i>Intitulé de l'action</i>	Déclencheurs, conditions et modalités de l'action	Entité modifiée par l'action <i>Résultat de l'action</i>
Siège épiscopal : <i>crée une église</i>	L'action se produit quand la satisfaction des paroissiens vis-à-vis de l'église qu'ils fréquentent n'est plus suffisante Condition : l'église créée et l'église préexistante doivent toutes deux bénéficier de suffisamment de revenus pour assurer l'entretien du prêtre et des bâtiments	<i>église : apparition dans le territoire paroissial de l'église préexistante, à une certaine distance de celle-ci</i> <i>église préexistante : diminution de son ressort paroissial</i>
Cour seigneuriale laïque ou monastique : <i>crée une église</i>	L'action se produit quand la cour a suffisamment de pouvoir. Les églises créées par les cours seigneuriales bénéficient de relativement peu de droits paroissiaux	<i>église : apparition sur le ressort seigneurial</i>
Cour seigneuriale laïque : <i>restitue</i>	Le choix de l'entité à laquelle est restituée l'église est probabiliste. Il s'agit le plus souvent du monastère le plus puissant à proximité de l'église restituée ou, surtout vers la fin de la période, du siège épiscopal	<i>Cour seigneuriale laïque : perd l'exercice de droits paroissiaux</i> <i>Monastère OU siège épiscopal : gagne l'exercice de droits paroissiaux sur cette église</i>
Cour seigneuriale laïque : <i>demande des droits paroissiaux</i>	Un seigneur laïc peut demander qu'une église située sur ou à proximité du centre de son ressort bénéficie de droits paroissiaux. Si le seigneur est suffisamment puissant, l'évêque accepte même si le ressort paroissial de l'église est peu important	<i>église : acquiert de nouveaux droits paroissiaux</i>
Cour seigneuriale : <i>contrôle/protège</i>	La règle permettant de déterminer si une cour contrôle ou non un foyer paysan, est en partie aléatoire, en partie déterminée par la puissance de la cour et la proximité de son ressort à l'unité d'exploitation du foyer paysan considéré	<i>Cour seigneuriale : contrôle des foyers paysans ; gagne ou perd du pouvoir</i>

Cette diapositive présente un exemple de règles d'action de différentes entités, ainsi que les résultats de ces actions.

Entités sociales : buts, moyens et leurs implications spatiales

Entité sociale	Buts/projets/objectifs	Moyens
Foyer paysan	Assurer son salut	Respecter les règles de l'Eglise : aller à l'église, s'acquitter des droits paroissiaux
	Se nourrir	Obtenir de bonnes terres en tenure ; minimiser les corvées et droits à s'acquitter (banaux, de justice...) => déménagement ou fuite pour être sous la domination d'un seigneur davantage bienveillant si ces conditions ne sont pas atteintes Être alleutier Appartenir à une communauté agraire
	Éviter d'être l'objet de violences (pillages, viols...)	Servir un seigneur suffisamment puissant pour le protéger Habiter près d'une forteresse (se réfugier dans l'enceinte) ou dans un cimetière (église et cimetières bénéficient de la protection du droit d'asile)

Cette diapositive et les deux suivantes illustrent comment nous avons défini les buts et moyens de trois entités sociales, ainsi que les implications spatiales (directes ou indirectes) de ces règles de comportement.

Entités sociales : buts, moyens et leurs implications spatiales

Entité sociale	Buts/projets/objectifs	Moyens
Seigneur laïque	Acquérir des ressources Assurer sa puissance	Disposer de terres Éviter le pillage de ses terres : création de châteaux, alliances avec d'autres seigneurs Piller et attaquer d'autres seigneurs (razzias) Exercer des droits de justice, des droits banaux, des droits paroissiaux, différentes charges Disposer de fidèles pour faire la guerre : chevaliers et paysans mobilisables. Disposer de main d'œuvre pour exploiter ses terres : paysans corvéables. Coopérer avec les moines pour avoir leurs conseils, leurs compétences intellectuelles (établissement de chartes...) et leurs compétences logistiques (réalisation d'infrastructures telles qu'étangs, moulins...).
	Assurer son salut	Faire des dons aux églises/abbayes/évêques. Créer des prieurés. Faire pénitence, éviter l'excommunication, racheter les violences par des dons aux églises Être charitable envers les pauvres (don de pain, création d'établissements pour les lépreux). Prier ou faire prier pour lui et les membres de son lignage, vivants et morts (commémorations funéraires assurées par les moines).

Entités sociales : buts, moyens et leurs implications spatiales

Entité sociale	Buts/projets/objectifs	Moyens
Seigneurie monastique	Assurer le salut du plus grand nombre de fidèles possibles	Faire l'aumône aux pauvres Soigner les malades. Contribuer à l'encadrement pastoral (notamment dans les prieurés)
	Enrichir l'Eglise	Convaincre les seigneurs laïques de faire des dons importants pour racheter leurs péchés, en particulier à l'article de la mort Faire prospérer les domaines ecclésiastiques en attirant la main d'œuvre, en investissant dans des équipements (moulins, étangs)

Cheminement méthodologique

- **Entretiens semi-directifs selon une grille de lecture géographique multi-échelle**
- **Définition des entités sociales et spatiales impliquées dans la transition** : foyers paysans, seigneurs laïcs et ecclésiastiques, siège épiscopal, autorité centrale – églises, châteaux, prieurés – communautés agraires, agglomérations (villages, villes)
- **Modélisation sous forme de schémas** : diagrammes sagittaux, diagrammes entités-relations
- **Identification de faits stylisés** : règles de comportement des entités sociales et spatiales
- **Implémentation informatique du modèle**

A l'issue de ce cheminement méthodologique et conceptuel, nous avons développé un modèle de simulation informatique des dynamiques spatiales de la transition 800-1100.

Un modèle multi-agent

Version simplifiée : pas de distinction entre seigneurs laïcs et ecclésiastiques ; monastères et prieurés non modélisés ; siège épiscopal non modélisé

Environnement

Une zone carrée de 100 × 100 km représentant de manière simplifiée une région de l'Europe du Nord-Ouest en 800

Agents

Foyers paysans, seigneurs, zones de prélèvement, agrégats de foyers paysans, châteaux, églises

Ce modèle constitue une version simplifiée du modèle conceptuel précédemment évoqué. Il a été développé avec la plate-forme de modélisation agent GAMA.

Une simulation démarre en l'an 800 et se termine en 1160. Un pas de temps de simulation représente une durée de 20 ans, ce qui correspond approximativement à la durée de vie d'une génération à l'époque médiévale.

Tout au long de la simulation, des foyers paysans disparaissent et apparaissent – ce qui complexifie le suivi de leurs trajectoires spatio-temporelles –, des châteaux sont construits – renforçant le prélèvement de redevances par les seigneurs – 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.

Des agrégats de foyers paysans apparaissent, grossissent ou disparaissent. Un agrégat est défini comme un ensemble d'au moins 5 foyers paysans espacés les uns des autres de moins de 200m. Un village est un agrégat comportant de 5 à 29 foyers paysans ; une petite ville en comporte 30 ou plus. On détecte ces agrégats au moyen d'une approche de type graphe.

Un modèle multi-agent

Comportements des seigneurs

Création de châteaux

Création d'églises ; cession (restitution) d'églises

Acquisition de nouveaux droits seigneuriaux

Cession de droits seigneuriaux via l'établissement de relations de vassalité

Un droit seigneurial = une zone de prélèvement

Un droit = des points de puissance gagnés pour chaque foyer paysan qui y est assujetti

Les seigneurs laïques ou ecclésiastiques 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.

Un modèle multi-agent

Comportements des foyers paysans

Satisfaction calculée selon trois aspects :

- matérielle : se nourrir
- religieuse : assurer son salut
- protection : survivre aux razzias

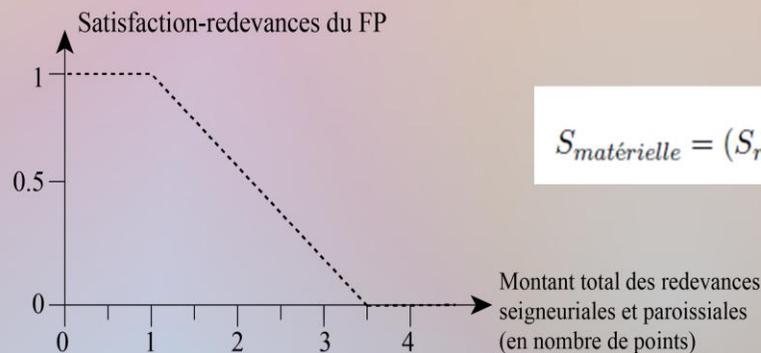
Les foyers paysans sont caractérisés par un ensemble de mesures de satisfactions (Matérielle, Religieuse, et en terme de Protection face aux violences), qui les poussent à se déplacer lorsque celles-ci sont trop faibles. Ces déplacements s'effectuent selon des modalités particulières selon les situations, mais visent systématiquement à l'augmentation de la satisfaction, selon une logique typique des modèles gravitaires.

Un modèle multi-agent

Comportements des foyers paysans

Satisfaction calculée selon trois aspects :

- matérielle : se nourrir
- religieuse : assurer son salut
- protection : survivre aux razzias



$$S_{matérielle} = (S_{redevance})^{(1-S_{contributions})}$$

La satisfaction matérielle d'un foyer paysan est une fonction ([0 ;1]) des redevances dont il doit s'acquitter (plus le foyer paysan doit s'acquitter de redevances, moins il est satisfait), de son appartenance ou non à une communauté agraire (un foyer paysan est davantage satisfait quand il appartient à une communauté agraire, et d'autant plus satisfait que la communauté agraire à laquelle il appartient est puissante) et de la présence locale d'un marché ou d'une foire.

Le montant des redevances seigneuriales dont chaque foyer paysan doit s'acquitter est la somme des droits des seigneurs dont dépend le foyer paysan.

La présence d'une communauté agraire et d'un marché ou d'une foire (contributions dont la somme est au maximum égale à 1) amènent à une augmentation de la satisfaction matérielle du foyer paysan.

Un modèle multi-agent

Comportements des foyers paysans

Satisfaction calculée selon trois aspects :

- matérielle : se nourrir
- religieuse : assurer son salut
- protection : survivre aux razzias

- En 800, si l'église avec sacrement du baptême la plus proche est à moins de 5km, la satisfaction religieuse $S_{religieuse} = 1$, entre 5 et 8km $S_{religieuse} = -1/3(distance) + 8/3$, au-delà de 8km $S_{religieuse} = 0$.
- En 950, si l'église paroissiale la plus proche est à moins de 3km $S_{religieuse} = 1$, entre 3 et 5km $S_{religieuse} = -0,5(distance) + 2,5$, au-delà de 5km $S_{religieuse} = 0$.
- En 1050, si l'église paroissiale la plus proche est à moins de 1,5km $S_{religieuse} = 1$, entre 1,5 et 3km $S_{religieuse} = -(2/3)(distance) + 2$, au-delà de 3km $S_{religieuse} = 0$.

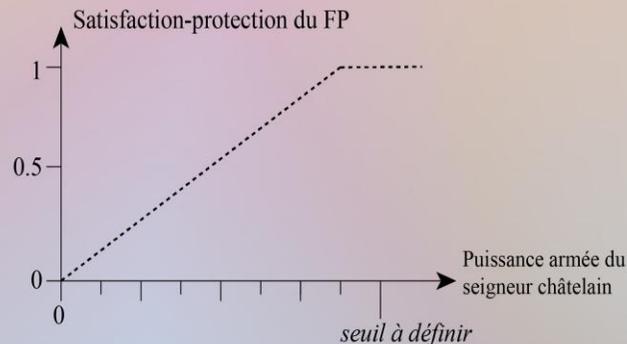
La satisfaction religieuse consiste en l'évaluation des distances à parcourir pour bénéficier des différents services paroissiaux, localisés en différentes églises (satisfaction inversement proportionnelle à la distance à parcourir). Les règles d'évaluation de la distance aux églises paroissiales varient au cours du temps.

Un modèle multi-agent

Comportements des foyers paysans

Satisfaction calculée selon trois aspects :

- matérielle : se nourrir
- religieuse : assurer son salut
- protection : survivre aux razzias



La satisfaction Protection d'un foyer paysan est une fonction de la puissance armée du seigneur châtelain dont le foyer paysan dépend. La valeur-seuil de puissance armée du seigneur à partir de laquelle la satisfaction *Sprotection* est égale à 1 devra être déterminée en fonction des résultats de simulation.

Un modèle multi-agent

Comportements des foyers paysans

Satisfaction calculée selon trois aspects :

- matérielle : se nourrir
- religieuse : assurer son salut
- protection : survivre aux razzias

$$Satisfaction\ totale = MIN(S_{matérielle}; S_{religieuse}; S_{protection})$$

Le calcul de la satisfaction globale, qui entraîne le choix ou non de se déplacer, se fait sans compensation : la satisfaction totale vaut la plus faible des satisfactions, quelque soit le niveau des deux autres.

Un modèle multi-agent

Comportements des foyers paysans

Satisfaction calculée selon trois aspects :

- matérielle : se nourrir
- religieuse : assurer son salut
- protection : survivre aux razzias

Déménagement pour tenter d'augmenter la satisfaction

- Déménagement local ou lointain

La probabilité de déplacement d'un foyer paysan est de $1/\text{Satisfaction}$.

Si un déplacement local (dans un rayon de $\sim 5\text{km}$), dans lequel les attracteurs sont les églises, châteaux et communautés agraires, permet d'augmenter la satisfaction, alors le foyer paysan se déplace.

Si ce déplacement local n'augmente pas la satisfaction, alors le foyer paysan procède à un déplacement lointain : les attracteurs considérés sont alors ceux de l'ensemble de la région modélisée.

Un modèle multi-agent

Du côté de l'implémentation

Un déroulement simple

```
init { do generer_monde; }  
reflex MaJ_globale { do reset_globals; }  
reflex renouvellement_monde when: (time > 0){  
reflex MaJ_Agregats{  
reflex Deménagement_FP {  
reflex MaJ_Chateaux {  
reflex MaJ_Eglises {  
reflex MaJ_Droits_Seigneurs {  
reflex MaJ_ZP_et_preleveurs {  
reflex Dons_des_Seigneurs {  
reflex Constructions_chateaux {  
reflex MaJ_satisfaction_FP {  
reflex fin_simulation {
```

Le modèle est implémenté sur la plate-forme GAMA (1.6.1), et chaque type d'agent (Foyer Paysan, Seigneur, Agrégats etc.) agit par le biais de « réflexes », dans un ordre fixé.

Cet ordre, à l'échelle de chaque type d'agent, peut être résumé assez brièvement, comme le montre cet extrait de code.

Un modèle multi-agent

Du côté de l'implémentation

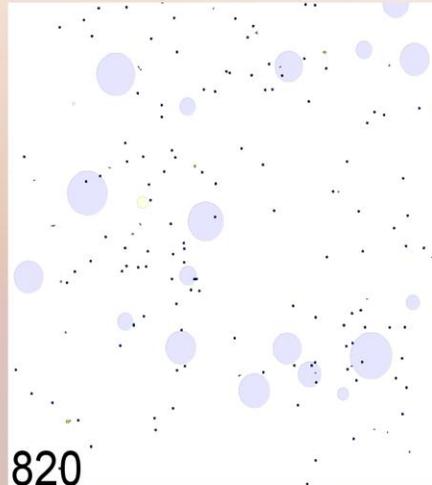
Exemple des Zones de Prélèvement

2 grands types :

- Zones de Prélèvement disséminées
- Zones de Prélèvement des Châteaux

4 sous-types :

- Prélèvement de loyer (bleu)
- Prélèvement de droits de Haute Justice (rouge)
- Prélèvement de droits banaux (vert)
- Prélèvement de droits de basse et moyenne Justice (jaune)

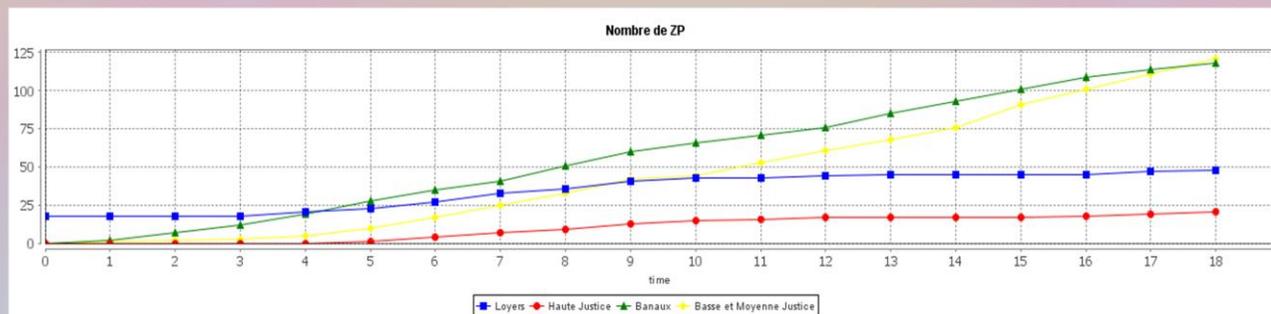
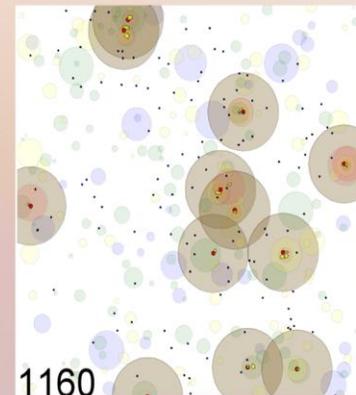
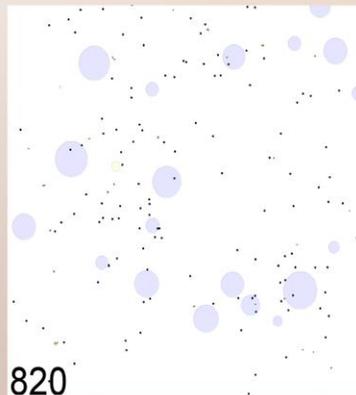


Les zones de prélèvement sont des zones de forme circulaire, de rayon varié, dans lesquelles les seigneurs prélèvent des redevances. Une zone de prélèvement est créée par un seigneur. Les attributs d'une zone de prélèvement sont : le détenteur (unique) correspondant au seigneur qui l'a créée, le rayon, le taux de prélèvement, ainsi qu'une liste des seigneurs ayant obtenu des droits de prélèvement sur cette zone, de même que la part de possession de chacun de ces seigneurs.

Si 100 foyers paysans sont situés sur une zone de prélèvement dont le taux de prélèvement est de 30 %, et que 3 seigneurs se partagent équitablement (1/3 chacun) les redevances de cette zone, chacun de ces seigneurs prélèvera des redevances à 10 foyers paysans.

Un modèle multi-agent

Du côté de l'implémentation



Tout au long de la simulation, et en raison du morcellement croissant des pouvoirs seigneuriaux que de l'apparition de nouveaux seigneurs, le nombre de zones de prélèvement de chaque type ne fait qu'augmenter, et avec lui, les recouvrements de zones de prélèvement : plus le nombre de zones de prélèvements entourant un foyer paysan est important, plus celui-ci sera amené à payer de redevances, et plus sa satisfaction matérielle s'en verra diminuée.

Un modèle multi-agent

Du côté de l'implémentation

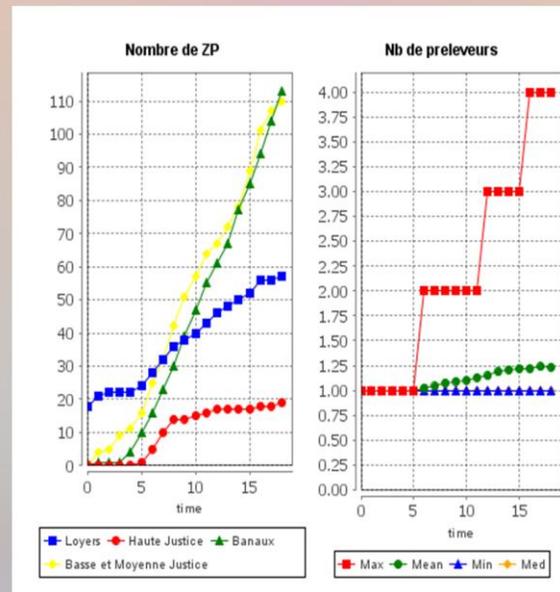
Exemple des Zones de Prélèvement

Certaines Zones de Prélèvement que l'on peut céder entièrement :

- Celles des châteaux, dont le propriétaire peut confier la garde à un autre seigneur
- Des droits qu'un Grand Seigneur octroie à l'un de ses vassaux.

D'autres sur lesquelles le seigneur peut céder une partie des droits seulement :

- Revenus propres, revenus de cession etc...



Le nombre de zones de prélèvement augmente tout au long d'une simulation et celles-ci se voient de plus en plus partagées entre différents seigneurs. Le second graphique présente le nombre de seigneurs collecteurs pour chaque zone : dans cet exemple, une unique zone de prélèvement peut correspondre à des prélèvements de redevances de 4 seigneurs différents.

Discussion

Connaissances historiques => faits stylisés => modèle informatique

Simplifier sans dénaturer le propos

Expliciter l'implicite

Concevoir un modèle utile = qui apporte un éclairage
renouvelé sur la période et les phénomènes considérés

Cet apport du modèle n'est pas encore attesté ; il doit être
soumis à la communauté des chercheurs du domaine

Autre utilité possible : un support pour l'enseignement

L'étude qui est présentée ici est un cas d'application de modélisation et de simulation dans un contexte interdisciplinaire.

Nous avons cherché à dégager des faits stylisés qui conservent un niveau de complexité acceptable *pour* et accepté *par* les experts du domaine. Toute démarche de modélisation suppose une simplification, mais il ne s'agissait pas pour nous d'aboutir à une vision simpliste du domaine.

Pour ce faire, nous sommes passés graduellement d'une description littéraire des phénomènes à leur représentation sous des formes plus abstraites, pour au final parvenir à la définition d'entités (objets) implémentés dans un modèle multi-agent. Ces entités ont un sens pour les experts du domaine.

Ce travail a poussé les archéologues et historiens à regarder comment le segment sur lequel chacun d'entre eux travaille s'insère dans des dynamiques d'ensemble. La contrainte de modéliser des dynamiques spatiales et d'adopter une grille de lecture précise de ces dynamiques les a aidé à distinguer, parmi les éléments (faits, processus) connus de la transition 800-1100 ceux qui sont axiomatiques de ceux qui résultent d'une démonstration.

Perspectives

Paramétrage du modèle à partir de l'exemple de la Touraine

Calibrage automatique avec une fonction d'objectif ?

Exploration des résultats pour ce scénario « tourangeau » :
analyse de stabilité et de sensibilité

Simulation de scénarios représentant d'autres régions
(région de montagne avec communautés agraires fortes,
région ne comportant qu'un seul grand seigneur...)

L'étape suivant l'implémentation du modèle est son paramétrage. L'objectif est de trouver des jeux de paramètres 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 qui disposent de différents indicateurs quantitatifs permettant une comparaison entre dynamiques observées (connues) et simulées.

Dans un second temps, on cherchera à simuler des scénarios, c'est-à-dire qu'en modifiant certains paramètres, on souhaite parvenir à 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.