

## **Projet de recherche**

### **Un modèle multi-agents pour comprendre la dynamique des systèmes pastoraux d'altitude dans la longue durée**

#### **Résumé :**

Mes recherches s'attachent aux espaces pastoraux d'altitude dans la longue durée et s'intègrent dans le cadre de recherches menées en archéologie pastorale dans les Pyrénées. J'ai conduit une démarche ethnoarchéologique visant à une meilleure compréhension des pratiques de ces espaces à travers deux axes, soit l'élaboration d'un corpus de sites pastoraux d'altitude inédit et la constitution d'un référentiel actuel de parcours de troupeaux. L'objectif est d'envisager les territoires pastoraux, leurs recompositions et surtout d'identifier leurs corrélats matériels permettant de les approcher à la fois dans l'actuel et dans la longue durée. Les cabanes et les enclos qui président au déploiement des troupeaux ont aussi été envisagés de manière plus large, sous l'angle des territoires, en relation à d'autres sources, à savoir les résultats des disciplines paléoenvironnementales, les sources planimétriques et les sources écrites conservées par les communautés valléennes depuis le Moyen Âge.

La thèse m'a permis de constituer un important corpus de terrain (données archéologiques et ethnologiques) et de construire un Modèle Conceptuel de Données fondé sur la triade homme-ressources-troupeaux. Cependant, l'emploi d'un Système d'Information Géographique n'a rendu possible qu'une approche assez statique de l'utilisation du territoire pastoral et de ses transformations. Pour y pallier, je souhaiterais développer dans le cadre de ce projet des modèles de simulation pour étudier la dynamique des interactions entre ressources et sociétés pastorales dans la longue durée, non pas pour tenter de reconstituer l'évolution réelle des phénomènes, mais pour explorer différentes hypothèses et avancer dans la compréhension des processus de transformation de ces derniers.

**Mots clefs :** archéologie du paysage, montagne, territoire, analyse spatiale, cabane, ethnologie, environnement, Pyrénées, longue durée, Moyen Âge, modélisation multi-agent, simulation multi-agents (SMA).

#### **1 Présentation de l'état de la recherche**

Ce projet anthropologique se situe à l'interface de deux grands domaines, l'archéologie du pastoralisme et la modélisation spatiale.

Si le pastoralisme est étudié depuis longtemps par les archéologues (CHANG, KOSTER 1986), la haute montagne et son exploitation pastorale ne sont étudiées que depuis quelques années (BARKER, GRANT 1991, RENDU 2003b). Les espaces d'altitude ont longtemps été perçus comme immobiles. Des approches interdisciplinaires ont montré qu'ils avaient une histoire. Leurs paysages et leurs formes d'exploitation ont varié au cours de temps, ce qui permet d'approcher les transformations des systèmes pastoraux sur la très longue durée, depuis 6000 ans.

Les recherches menées dans les Pyrénées de l'est, en Cerdagne par Christine Rendu ont livré plus d'une centaine de structures pastorales - cabanes de bergers et enclos- sur 3000 ha. La fouille d'une vingtaine de sites a fourni des repères chronologiques, ce qui a permis d'établir une chrono-typologie. Fondée sur la morphologie des cabanes, des enclos et les équipements des sites, cette typologie fonctionnelle renseigne les types d'élevage. La confrontation de ces données archéologiques avec les sources écrites, les données de l'ethnologie et l'apport des disciplines paléoenvironnementales a permis de montrer les transformations des systèmes pastoraux dans la très longue durée. On a pu documenter, notamment, le passage d'un système extensif à un système intensif, ou encore le passage d'un élevage laitier à un élevage centré sur la viande ou la laine (RENDU 2003a).

Par ailleurs, le développement des systèmes multi-agents depuis quelques années offre de nouvelles perspectives pour modéliser le comportement des troupeaux dans le prolongement de mes travaux exposés plus loin. La modélisation multi-agents permet de conceptualiser et de simuler un ensemble organisé d'agents en interaction, entre eux et avec leur environnement. Dans les Sciences de l'Homme et de la Société, elle permet de formaliser des situations complexes comportant des échelles (spatiales, temporelles, organisationnelles) multiples et des agents hétérogènes engagés dans des activités sociales (AMBLARD, PHAN 2006 : 19).

Les outils de simulation sont depuis quelques années couramment utilisés en géographie pour modéliser les dynamiques spatiales. Issus de la recherche en intelligence artificielle, les outils utilisés sont généralement de deux types : les Systèmes Multi-Agents (SMA) et les Automates Cellulaires (AC). Dans les deux cas, ils permettent de simuler la genèse d'une structure spatiale en se plaçant au niveau micro, c'est-à-dire au niveau des individus – ou agents –, dont les interactions provoquent des organisations spatiales. La structuration de l'espace n'est donc pas introduite *a priori* dans le modèle, mais ce sont au contraire les processus de son apparition qui sont ici étudiés. Dans un SMA, les agents sont

des individus (personnes, animaux, etc.) mobiles et autonomes, dotés de connaissances, de compétences et d'objectifs propres, qui sont capables d'agir dans un environnement et de communiquer entre eux. Dans un AC, les agents sont des entités spatiales, des cellules, caractérisées par un certain nombre d'attributs définissant leur état à un moment précis et dotées d'une « durée de vie » préétablie. Ce sont les interactions (dans le cas des SMA) ou les transformations d'état (dans le cas des Automates Cellulaires) des agents qui introduisent la dynamique dans le modèle, la structure de l'espace évoluant à chaque mouvement ou changement d'état des agents. Ces mouvements ou transformations des agents sont conditionnés par un certain nombre de règles d'interaction ou de transition définies *a priori* par l'opérateur. Plusieurs expériences peuvent être réalisées en adoptant différentes règles, de manière à évaluer leur impact sur l'organisation spatiale du phénomène étudié. À partir de ces différentes simulations, il est également possible de calculer la probabilité d'obtenir une structure particulière en fonction des règles introduites.

La capacité des systèmes multi-agents à modéliser les territoires agro-pastoraux dans leur complexité a déjà été démontrée (BONNEFOY, BOUSQUET, ROUCHIER 2001, ROUCHIER *et al.* 2001). Ces exemples montrent que ces outils sont non seulement susceptibles de spatialiser et de distribuer le comportement des individus mais qu'ils autorisent surtout l'intégration de perceptions différenciées de l'espace par les individus et de contraintes exercées par une collectivité. Une dialectique s'instaure entre individus, espaces et société, qui contribue à la simulation d'un territoire par le biais de pratiques spatiales et de représentations sociales clairement définies, propres à tester les théories et hypothèses géographiques (BONNEFOY *et al.* 2000).

Peu connus dans la communauté archéologique française<sup>1</sup>, les outils de simulation sont des outils déjà bien expérimentés par plusieurs groupes de recherche aux Etats-Unis, en préhistoire notamment (KOHLER 1992, KOHLER, GUMERMAN 2000, KOHLER, GUMERMAN, REYNOLDS 2005, KOHLER, VAN DER LEEUW 2007 par exemple). En archéologie, ces outils offrent un véritable potentiel pour les études sur la dynamique urbaine ou la dynamique du peuplement par exemple, non pas pour tenter de reconstituer l'évolution réelle d'un phénomène, mais pour explorer différentes hypothèses et avancer dans la compréhension des processus de transformation de ce dernier. En introduisant une réelle dynamique, ce type de modélisation apporte des éléments de réflexion sur les temporalités à

---

<sup>1</sup> Ils sont cependant mis en œuvre dans le cadre du programme ANR *Transmondyn*, 2011-2015, coordonné par Lena Sanders, UMR 8504.

l'œuvre dans la transformation d'un système. Il s'agit d'outils d'analyse exploratoire puissants, ne serait-ce que par la masse de données qu'ils sont capables de mobiliser de manière interactive, qu'il nous paraît important d'exploiter pour envisager de nouveaux modes de traitement et d'analyse de nos données archéologiques. L'utilisation de ces outils et les méthodes qu'ils impliquent, ainsi que les conditions de leur transfert de la géographie vers l'archéologie nécessitent une bonne compréhension de leur fonctionnement et des concepts préalables.

## **2 Exposé de mes recherches**

Lors de l'analyse spatiale des sites pastoraux de la montagne d'Enveig (Pyrénées, France), j'ai étudié la répartition des cabanes en fonction de paramètres environnementaux à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) (LE COUÉDIC 2004). Au moment d'aborder la question du territoire (aire d'influence) de chaque cabane, la question des parcours de troupeaux s'est avérée centrale. Cette approche interdisciplinaire butait en effet sur une difficulté, l'appréhension des pratiques pastorales autour des sites fouillés. Quelles utilisations et quels partages de l'espace peuvent engendrer les différentes formes de gestion du troupeau? Les pâturages d'altitude pyrénéens constituent le plus souvent une ressource collective, exploitée par les communautés d'habitants des hautes vallées. À grande échelle, les partages territoriaux de ces estives ne sont pas marqués sur le terrain ; ils se définissent essentiellement par la pratique, lors de la dépaissance du bétail depuis les cabanes pastorales.

Pour envisager ces pratiques et ces partages à différentes époques, mon étude a reposé sur une démarche ethnoarchéologique visant à une meilleure compréhension des pratiques de ces espaces à travers deux axes, soit l'élaboration d'un corpus de sites pastoraux d'altitude inédit et la constitution d'un référentiel actuel de parcours de troupeaux. L'objectif était d'envisager les territoires pastoraux, leurs recompositions et surtout d'identifier les corrélats matériels permettant de les approcher à la fois dans l'actuel et dans la longue durée. Il s'agissait de réunir les connaissances nécessaires pour construire des modèles spatiaux, avec pour but, à terme, de modéliser et de simuler des parcours possibles à partir des sites pastoraux anciens. L'hypothèse de départ était la suivante : les parcours de troupeaux varient selon les systèmes pastoraux. On peut alors se demander dans quelle mesure ils déterminent la localisation des cabanes de bergers ou encore les partages de l'espace pastoral.

Ma thèse a donc consisté à étudier l'espace et les pratiques pastorales à travers les parcours de troupeaux, dans une perspective ethnoarchéologique (LE COUÉDIC 2005, LE COUÉDIC 2010). La démarche suivie a abouti à des résultats significatifs et a ouvert des

pistes nouvelles. A partir de trois composantes fondamentales que sont la société pastorale, les troupeaux et les ressources du milieu, j'ai abordé le système pastoral essentiellement sous l'angle de ces traces matérielles. La construction d'un référentiel archéologique de structures de parcsages et d'habitats sur l'estive d'Anéou, en Ossau, (Pyrénées, France) a permis d'établir une chrono-typologie fonctionnelle des établissements pastoraux documentant trois périodes principales : Âge du Bronze, Antiquité tardive, Époque moderne et contemporaine (CALASTRENC, LE COUÉDIC, RENDU 2006, RENDU *et al.* Sous presse). Pour approcher l'espace que les cabanes gouvernent, j'ai constitué un référentiel actuel de parcours de troupeaux afin d'en appréhender les déterminants sociaux, techniques et environnementaux. Deux corpus ont été mis en œuvre. Le premier était constitué par la cartographie réalisée par le Parc National des Pyrénées, des aires de dépaissance de 500 troupeaux à l'estive qui m'a permis d'étudier la forme des parcours et de mettre en évidence leurs variations en fonction des types de troupeaux et des systèmes pastoraux. Approcher les relations entre ces parcours et leurs corrélats matériels demande d'envisager ces territoires à l'échelle journalière, à partir des cabanes d'où ils se déploient. Dans cette optique, la cartographie du Parc a été affinée par deux mois d'enquêtes en vallées d'Aspe et d'Ossau. L'exploitation de ces enquêtes permet d'envisager les partages de l'espace pastoral tels qu'ils sont vécus par les bergers à l'échelle des circuits journaliers et la mise en évidence de certains corrélats matériels de ces parcours, utiles à la compréhension des structures archéologiques.

La confrontation des données archéologiques et ethnologiques avec les sources écrites médiévales et modernes et avec les données palynologiques a permis d'affiner les résultats et de resserrer la focale en rapprochant la répartition des cabanes et des parcours de la structuration territoriale des vallées et des différents modes d'attribution et de gestion des estives. C'est l'une des pistes pour rendre compte de la contradiction apparente entre les sources concernant le Moyen Âge : alors que l'activité pastorale est bien attestée par les sources écrites qui indiquent que les estives sont attribuées à des villages en indivision et que les places d'estivages sont délivrées par tirage au sort et qu'elle est corroborée par la palynologie, qui révèle une croissance de la pression anthropique entre le 9<sup>e</sup> et le 15<sup>e</sup> s, les structures pastorales du Moyen Âge central et final sont rares dans le corpus archéologique. Ce manque de visibilité pourrait s'expliquer par un moindre investissement des bergers dans des lieux non appropriés régulièrement redistribués.

### **3 Projet de recherche**

La thèse m'a permis de constituer un important corpus de terrain (données archéologiques et ethnologiques) et de construire un Modèle Conceptuel de Données fondé sur la triade homme-ressources-troupeaux. L'emploi d'un Système d'Information Géographique a permis une approche descriptive de l'utilisation du territoire pastoral dans la longue durée qui a ouvert de nombreuses perspectives. Cette recherche a permis d'avancer sur les connaissances nécessaires à l'objectif final, la modélisation et la simulation de parcours possibles sur les sites anciens.

Pour prolonger et approfondir ces recherches, j'envisage la mise en œuvre de techniques de simulation multi-agents, dans la perspective d'approcher notamment la dynamique des interactions entre ressources et sociétés. Si plusieurs modèles de tels systèmes existent déjà pour des systèmes agro-pastoraux actuels (*e.g.* BAH *et al.* 2006, BONNEFOY *et al.* 2000, BONNEFOY, BOUSQUET, ROUCHIER 2001, HILL 2006), il faut maintenant envisager leur application dans la longue durée. L'objectif premier est l'application des modèles de territoires pastoraux aux données archéologiques, non pour tenter de reconstituer l'évolution réelle des phénomènes, mais pour tester différentes hypothèses.

J'envisage donc de modéliser les interactions entre des groupes de population pastorales fondés sur des principes de coopération et/ou de concurrence, en m'appuyant sur des modèles déjà élaborés par ailleurs. Après avoir généré une description verbale des processus de structuration du système pastoral, la formalisation sera l'occasion de définir les agents, les entités spatiales, les interactions, le domaine de représentation et de l'apprentissage...

Articulé sur une durée de neuf mois, le déroulement de cette étude peut être envisagé en cinq étapes. La première correspond à un dépouillement bibliographique des études de simulation appliquées à l'archéologie, réalisée notamment au sein du laboratoire d'accueil. La seconde consiste en l'élaboration du modèle, au moyen du formalisme standard de modélisation UML (Unified Modeling Language). Ce modèle devra ensuite être implémenté ; à ce titre, mon séjour à l'université de Cambridge sera l'occasion de me former aux techniques informatiques de programmation (Java) pour passer du modèle formel au programme. Le modèle permettra alors d'explorer et de tester différents scénarios, variables en fonction des paramètres sociaux et environnementaux, soit les critères affectés aux agents et à l'environnement. La dernière étape de l'étude est la restitution des résultats lors des conférences et publications.

Ces outils de simulation, parce qu'ils permettent d'introduire une réelle dynamique, paraissent particulièrement pertinents pour simuler la genèse de structures spatiales et leur évolution. Ils pourraient permettre d'avancer dans la compréhension des processus de transformation des systèmes pastoraux et leur traduction en termes d'utilisation de l'espace. Par ailleurs, la réalisation de ce projet serait un moyen de contribuer au développement de l'archéologie métropolitaine en y apportant une expérience sur les systèmes multi-agents.

Ce projet de recherche postdoctoral intitulé « Une approche multi-agent pour comprendre les dynamiques d'un espace pastoral d'altitude dans la longue durée » devra permettre d'établir un protocole pour avancer dans la compréhension de l'exploitation des espaces d'altitude et plus largement, dans la connaissance des systèmes pastoraux de montagne. Ce sujet ouvre un espace de recherche neuf, constitué autour de la relation entre les pratiques spatiales de dépaissance et les dynamiques des territoires pastoraux d'estivage dans le temps long. Entre modélisation spatiale et archéologie pastorale, ce projet se situe à l'interface de différentes disciplines, anthropologie et archéologie tout d'abord, mais aussi histoire, éthologie, écologie, pastoralisme, géographie, informatique, intelligence artificielle, simulation et cognition. Il s'inscrit dans les thèmes de recherche soutenus par la fondation de la maison des Sciences de l'Homme à plusieurs titres :

- en raison de ses champs disciplinaires (archéologie, anthropologie, et éthologie),
- de part son caractère interdisciplinaire, novateur et les réflexions méthodologiques et épistémologiques qu'il demande,
- enfin parce qu'il envisage le pastoralisme et l'espace pastoral comme un système, à la fois comme un système de représentation et comme un système technique.

J'aimerais pouvoir réaliser ce projet à l'université de Cambridge, dans laquelle les « Digital humanities » occupent une place importante ; ce serait l'occasion pour moi de bénéficier de la compétence des chercheurs rattachés à la faculté d'archéologie et d'anthropologie (département d'archéologie), qui travaillent notamment sur les sociétés anciennes, la simulation du comportement et les thématiques géospatiales. Si le Département d'archéologie de Cambridge regroupe un large éventail de sujets archéologiques dans le temps et dans l'espace, les groupes de recherches « paysages humanisés » et « recherche en archéologie spatiale » offrent un environnement exceptionnel pour poursuivre mes recherches. Par ailleurs, d'un point de vue pratique, le département fournit un ensemble de matériels et de logiciels pour l'acquisition, l'analyse et la représentation de l'information spatiale. Enfin, bien

sûr, ce serait l'opportunité pour moi de perfectionner ma pratique de la langue anglaise, que j'ai surtout eu l'occasion de lire et d'écrire mais peu de parler ; outre la réalisation du projet de recherche, l'obtention de cette bourse représente la possibilité de m'insérer dans un réseau scientifique européen en établissant des contacts et des coopérations.

## **Bibliographie**

AMBLARD, PHAN 2006

Amblard F. et Phan D. (dir.) - *Modélisation et simulation multi-agents : applications pour les sciences de l'homme et de la société*, Paris, Hermès, 446 p.

BAH et al. 2006

Bah A., Touré I., Page C. L., Ickowicz A. et Diop A. T. - An agent-based model to understand the multiple uses of land and resources around drillings in Sahel, *Mathematical and Computer Modelling*, 44: 513-534.

BARKER, GRANT 1991

Barker G. et Grant A. - Ancient and modern pastoralism in Central Italy: an interdisciplinary study in the Cicolano mountains, *Papers of the British School at Rome*, 59: 15-88.

BONNEFOY et al. 2000

Bonnefoy J.-L., Page C. L., Rouchier J. et Bousquet F. - Modelling spatial practices and social representations of space using multi-agent systems, in: G. Ballot et G. Weisbuch (dir.), *Applications of Simulation to Social Sciences*, Paris, Hermes: 155-168.

CALASTRENC, LE COUÉDIC, RENDU 2006

Calastrenc C., Le Couédic M. et Rendu C. - Archéologie pastorale en vallée d'Ossau. Problématiques, Méthodes et premiers résultats, *Archéologie des Pyrénées Occidentales et des Landes*, 25: 12-30.

CHANG, KOSTER 1986

Chang C. et Koster H. A. - Beyond bones : toward an archaeology of pastoralism, *Advances in archaeological method and theory*, 9: 97-148.

HILL et al. 2000

Hill D., et al. - Modélisation de l'entretien du paysage par des herbivores en moyenne montagne : une approche multi-agents, *Ingénieries - E A T*, 21: 63-75.

KOHLER 1992

Kohler T. A. - Field houses, Villages, and the Tragedy of the Commons in the Early Northern Anasazi Southwest, *American Antiquity* 57 617-635.

KOHLER, GUMERMAN 2000

Kohler T. A. et Gumerman G. J. (dir.) - *Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-based Modeling of Social and Spatial Processes*, New York Oxford University Press.

KOHLER, GUMERMAN, REYNOLDS 2005

Kohler T. A., Gumerman G. J. et Reynolds R. G. - Simulating ancient societies. Computer modeling is helping unravel the archaeological mysteries of the American Southwest, *Scientific American*, july: 73-84.

KOHLER, VAN DER LEEUW 2007

Kohler T. A. et Van der Leeuw S. E. (dir.) - *The Model-Based Archaeology of Socionatural Systems*, 304 p.



LE COUÉDIC 2004

Le Couédic M. - *La montagne d'Enveitg (66) : mise en œuvre des données archéologiques, environnementales et planimétriques à l'aide d'un SIG*, mémoire de maîtrise, Histoire, Université François Rabelais, Tours, 97 p.

LE COUÉDIC 2005

Le Couédic M. - *Conceptions et pratiques pastorales: modélisation de parcours actuels de troupeaux dans une perspective ethnoarchéologique. Étude de cas pyrénéens*, mémoire de master 2 recherche, Histoire, Université François Rabelais, Tours, 95 p.

LE COUÉDIC 2010

Le Couédic M. - *Les pratiques pastorales d'altitude dans une perspective ethnoarchéologique. Cabanes, troupeaux et territoires pastoraux pyrénéens dans la longue durée*, thèse de l'université de Tours, 803 p, [en ligne], [http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/54/39/20/PDF/Lecouedic\\_VoIEXTE.pdf](http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/54/39/20/PDF/Lecouedic_VoIEXTE.pdf)

RENDU 2003a

Rendu C. - *La Montagne d'Enveig, une estive pyrénéenne dans la longue durée*, Canet, Trabucaire, 606 p.

RENDU 2003b

Rendu C. - Dossier spécial. La montagne. Habitats et systèmes pastoraux d'altitude (Pyrénées, Massif-Central, Alpes). L'occupation de la montagne, premiers acquis et perspectives. Avant propos, *Archéologie du Midi Médiéval*, 21: 142-145.

RENDU et al. Sous presse

Christine Rendu, Didier Galop, Carine Calastrenc, Mélanie Le Couédic, Damien Rius, Marie-Claude Bal - *Montagnes et campagnes d'Oloron dans la longue durée. Premiers résultats d'un programme interdisciplinaire, Aquitania*.