



HAL
open science

Redonner son poids au social : Formalisation d'une démarche intégrant facteurs socio-anthropologiques et environnementaux dans les approches d'observation et de modélisation des Systèmes Socio-écologiques Ruraux

Mehdi Saqalli

► To cite this version:

Mehdi Saqalli. Redonner son poids au social : Formalisation d'une démarche intégrant facteurs socio-anthropologiques et environnementaux dans les approches d'observation et de modélisation des Systèmes Socio-écologiques Ruraux. Système multi-agents [cs.MA]. Institut National Polytechnique Toulouse, 2020. <tel-03191104>

HAL Id: tel-03191104

<https://hal.science/tel-03191104v1>

Submitted on 6 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



Habilitation à diriger des Recherches

Présentée à

L'Institut National Polytechnique Toulouse

Par

Mehdi SAQALLI

Chargé de recherches CNRS

Laboratoire GEODE – UMR 5602 CNRS – Université Toulouse Jean Jaurès

Redonner son poids au social : Formalisation d'une démarche intégrant facteurs socio-anthropologiques et environnementaux dans les approches d'observation et de modélisation des Systèmes Socio-Ecologiques Ruraux

Le 09 décembre 2020

Pierre Bommel (HDR)	Chercheur Cirad	Rapporteur
Gil Mahé (HDR)	Directeur de Recherches IRD	Rapporteur
Marco A. Janssen	Professeur, Arizona State University,	Rapporteur
Odile Peyron (HDR)	Directrice de Recherches CNRS	Examinatrice
Martin Paegelow (HDR)	Professeur, Université Toulouse Jean Jaurès	Examineur
Carla Khater (HDR)	Directrice de Recherches, CNRS Liban	Examinatrice
Marc Deconchat (HDR)	Directeur de Recherches INRAE (Garant)	Examineur
Philippe Ramirez	Chargé de Recherches CNRS	Invité

Remerciements

Je souhaiterais commencer d'abord et avant tout par remercier et dédier ce manuscrit à ma compagne, Anne-Emmanuelle (Mana) pour tout ce qu'elle m'apporte, pour cette solidité et cet ancrage, cette tendresse et cet amour sans lesquels rien ne se construit. Nous construisons notre espace où grandissent et passent Titouan et Guillaume, nos enfants, à la vitalité, l'énergie et une envie de vivre, ou furieuse ou fluide, toujours rassurante ! La Tanière nous attend !

J'adresse ici mes pensées à mes parents, tous deux, Maman, Papa qui ont toujours été là pour moi, y compris dans des moments difficiles et douloureux, et dont je n'oublie pas le soutien et la présence, comme je n'oublie pas Malika (même si on n'arrive jamais à se parler plus d'une mn sur Skype). Merci beaucoup ! Je retrouve et embrasse mon frère et ma sœur (et leurs enfants : Hugo, Yanel, Noah et Mahé) avec lesquels cette année fut une grande année : comme quoi les confinements n'empêchent pas les retrouvailles ! Au-delà c'est toute ma famille (dont mes cousines Ilham, Afaf, Nadra, Siham et Zineb) que je salue, des deux continents et pays, de Fès à Demanges, du New Jersey à Casablanca en passant par Reims, Rouen, Paris ou St Cyprien (Bisous, Alice et Jean-Paul) et d'abord Laurence que j'embrasse ainsi que sa petite famille au Mesnil-St-Denis. J'y inclus bien sûr toute ma belle-famille, de Pézenas à Lyon, La Tour-du-Pin, les monts du Lyonnais, le Togo en passant par Maury !

Il me faut élargir mes remerciements à des amis et de belles rencontres au cours d'une vie pas uniquement de chercheur. Qu'ils soient ici remerciés, quelque peu dans le désordre : Nicolas et Mélanie Fabre-Duppi et leurs enfants, Samuel Thiriou et sa petite famille, Nathalie de Louvigny et la sienne, Fabrice Gangneron, Agdal et Akinat Waissan, Meddy et Marine Delsol et leurs pitchouns, Najib Serraj, Jalil Bencheikroun et sa famille, Béné et Juan et leur famille, Mahamadou Biga Diambeidou, son frère et sa famille, Alain Le Roi et sa famille, Patrick et Emilie Habasque et leurs familles (bientôt ce mariage !), JC Bois, Bruno O'Heix, Sylvain, Brice, Aude, et tant d'autres, que je ne peux pas tous citer. Je suis sûr d'ailleurs de m'en vouloir plus tard pour en avoir oublié ici ! Pour ceux-là, je m'excuse très vivement et très sincèrement par avance de ne pouvoir vous citer tous et toutes !

Je salue et remercie ici quelques collègues amis comme Albane Burens et Laurent Carozza, Julien Azuara, Mahamadou Belem (Grand Salut !), Frédérique Blot, Cécile Brun, Marie-Claude Bal, Gilles Casonato, Hedia Chakroun, Amadou Diallo, Axel Ducourneau, Sylvain Ferrant, Emilie Gil, Benoit Gaudou (merci spécial !), Ali Issaka, Pierre Johnson, Zeineb Kassouk, Eric Maire, Yayé Moussa, Nasser Rebaï, Hichem Rejeb, Léa Sébastien, Melio Saenz, Gilles Selleron, Pabamé Sougnabé, Franck Vidal (je ne trouve pas de jeux de mots pourris là mais demain, promis) et, de même, bien d'autres que j'oublie ici et que je regretterais plus tard de ne pas avoir cité comme ils ou elles le mériteraient.

Une vie de chercheur n'est pas un sentier solitaire et heureusement. Elle m'a donné l'occasion de faire quelques belles rencontres humaines et scientifiques qui chacun ou chacune, ont cru quelque peu en moi : Marcel Mazoyer, Mireille Dosso, Patrick Caron, Antoine Cornet, Jean-Marc d'Herbès, Pierre Defourny, Charles Bielders & Bruno Gérard, Djaby Bakary, Emmanuel Torquebiau, François Bousquet, Fred Amblard, Jean-Denis Vigne et Feue Anne Tresset (qu'elle soit ici immensément saluée), Feu Jean-Pierre Bocquet-Appel (malgré tout), Laurent Drapeau, Arnaud Elger, Patricia Fedrigo, Ali Issaka, Etienne Gondet, Dominique Schwartz, Aurélie Salavert, Françoise Gourmelon, Nathalie Combourieu-Nebout, Marie Alexandrine Sicre, Laurent Lespez, Marc Vander Linden, etc. etc. Encore une fois d'autres, toujours trop nombreux pour qu'on puisse les lister ici. Ainsi, si j'oublie de les citer ici, chaque personne citée dans ce manuscrit doit voir cela comme un remerciement.

Le fait de m'être retrouvé dans des communautés scientifiques si différentes, ROSELT, DGCD PAD, MAELIA, OBRESOC, MONOIL, PALEOMEX, SICMED & O-LIFE, illustre peut-être la diversité de mon parcours et chacune de ces communautés a enrichi ma compréhension du monde : qu'ils et elles soient tous sincèrement remerciés ! En particulier, je salue ici également les camarades traducteurs et partenaires de terrain que je ne souhaite pas oublier : Nobuntu Mapeyi, Chu Huu Tin, Mzee Ali, Amadou Moussa.

Je n'oublie pas les étudiants que j'ai eu la chance d'encadrer et de voir progresser, construire leur vie et leur pensée, ici listés par ordre alphabétique : Aurélien Richa, Clément de Meyer, Cristian Rojas, Doryan Kaced, Eva

Béguet, Juan Durango, Lionel Houssou, Lucie Morin, Marianne Cahierre, Nicolas Maestriperi, Raoul Iopue, Robin Clavard, Romain Méjean, Younes Talbi, Zakari Iguenad et quelques autres ! Non, ils ne sont pas mes padawans car ils ont vocation à être mes égaux.

Il est des rencontres intellectuelles comme des personnes : certaines claques et moments scientifiques mémorables me viennent de personnes que j'ai vu en action sur le terrain ou qu'au contraire je n'ai que lu : Mr Tardy, Mr Mazoyer, Mr Lhoste, Mr Caron, Mr Olivier de Sardan, Mr Lavigne-Delville & Mr Biershenk, Mr Barley, Mr Torquebiau, Mr Bousquet, Mme Ostrom, Mme Boserup, Mr Todd, Mr Ki-Zerbo, Mrs Crozier & Friedberg, Mr de Rosnay, entres autres

Je finirai cette tartine en remerciant très chaleureusement et très profondément les membres du jury d'avoir bien voulu accepter d'évaluer ce travail, de venir le commenter, le questionner et le discuter. Nombre d'entre eux devaient être cités plus tôt mais je les gardais ainsi ici : Pierre Bommel, maître initiateur en Multi-agents, Martin Paegelow, compagnon de modèle et de science au sein de mon laboratoire, Carla Khater, qui porte la recherche environnementale au Liban (et pas que) sur ses épaules, Gil Mahé comme moi méditerranéen ET africain, Odile Peyron, Philippe Ramirez et Marco Janssen, tous férus de multidisciplinarité et de goût pour différents lieux et différentes approches. Soyez ici remerciés. Je remercie enfin Marc Deconchat pour avoir accepté d'être mon garant, pour ses précieux conseils et sa bienveillance apaisée.

Finalement, ces remerciements suivent également la procédure MASSTABA (Modules Multi-Agent Socio-Spatialisés éTagés et Agencés en Briques Articulées) : Commencer par ce qui vous fonde, caractériser l'objet par ses interactions et ses motivations pour finir par ce qui le fait progresser.

1 Sommaires

Table des matières

Remerciements	2
1 Sommaires	4
2 Présentation des activités scientifiques	10
2.1 Curriculum vitae	10
2.2 Activités d'encadrement de la recherche et d'enseignement.....	11
2.2.1 Enseignements en master	11
2.2.2 Formations	11
2.2.3 Encadrements Postdoctorats, doctorats et masters	11
2.3 Programmes de recherche	14
2.3.1 Direction et coordination de projets de recherche	14
2.3.2 Projets non retenus.....	17
2.4 Administration et Animation de la recherche	19
2.4.1 Participation et direction d'axe de recherche	19
2.4.2 Participation dans des réseaux de recherche	19
2.4.3 Organisation de manifestations scientifiques	22
2.4.4 Evaluation de la recherche	22
2.5 Publications (Revue, Chapitres, Conférences)	23
3 Résultats scientifiques : Les systèmes socio-écologiques ruraux modélisés	34
3.1 Introduction.....	34
3.1.1 Remettre <i>anthropos</i> sur la scène	34
3.1.2 Problématique(s) scientifique(s)	35
3.1.3 Présentation du mémoire	36
3.2 Les Sahels : La petite maison dans le Sahel	38
3.2.1 Variabilité intrinsèque, dynamique démographique : approche sociospatiale	38
3.2.2 Dynamiques familiales et sociales à large impact : approche MASSE.....	44
3.2.3 Enjeux sociopolitiques des évolutions familiales : des modèles aux conséquences.....	49
3.3 Les Amazonies : le crépuscule des lances.....	55
3.3.1 Approche historique et anthropologique : une reconfiguration des espaces vécus.....	55
3.3.2 Approche spatiale : colonisation progressive et reconfiguration des identités locales	58
3.3.3 Modélisation de la colonisation agraire, de la contamination et de l'usage des terres	59
3.3.4 Conclusion partielle.....	62
3.4 Les Néolithiques : l'Europe, ce Nouveau Monde.....	65
3.4.1 Colonisation rubanée en Europe du Nord : le projet ANR OBRESOC.....	65
3.4.2 Paysage du Languedoc-Roussillon : le programme SICMED PALEOMEX	71
3.4.3 Conclusion partielle.....	74
4 Résultats scientifiques : Modéliser des systèmes socio-écologiques ruraux	76
4.1 Comprendre : Socio-anthropologie et démarches quantitatives	76
4.1.1 Introduction partielle	76
4.1.2 Contraintes à l'articulation des disciplines en modélisation quali-quantitative des SSERs.....	82
4.1.3 Modéliser est donc si difficile, conflictuel et ennuyeux ?	89
4.2 Enquêter : Approche spatiale de reconstitution des perceptions locales.....	93
4.2.1 Le Zonage A Dires d'Acteurs et le signal faible : Les enjeux du diagnostic territorial	93
4.2.2 Méthodologie du Zonage à Dires d'Acteurs	95
4.2.3 Ouverture thématique, coûts faibles et généricité géographique.....	98
4.2.4 ZADA : vers une amélioration de la méthodologie et de ses usages	99
4.2.5 Pluralité des utilisations des résultats du ZADA	101
5 Modéliser : une démarche de recherche	107
5.1 MASSE : Modélisation Multi-Agent Spatialisée des Socio-Ecosystèmes	107

5.1.1	Construire une méthodologie interdisciplinaire empirique à partir de terrains variés	107
5.1.2	Chercher la réfutabilité et la généralité	108
5.1.3	Equilibrer simplicité et complexité.....	110
5.2	Les étapes de MASSE	110
5.2.1	L'intrigue : ARDIQ, OSPHYT-DEEP.....	110
5.2.2	Décor, acteurs, scénarios	115
5.2.3	Unités de temps, de lieu et d'entité : les mailles	116
5.2.4	La MASSTABA de briques	118
5.2.5	Modélisation sociale des SSERs.....	125
5.3	Que faire avec un modèle « validé » ? Rétrospective, prospective, généralité spatiale, scénarios & alternatives de gestion.....	137
5.3.1	Rétrospective : Explorer et tester.....	137
5.3.2	Scénarisations	137
5.4	En guise de conclusion partielle : Exemple de séquence de modélisation.....	140
6	Perspectives de recherche	144
6.1	Bilan et propositions.....	144
6.2	Les questionnements méthodologiques sur l'interaction des modèles multi-agents.....	145
6.2.1	Avec les informations qualitatives	145
6.2.2	Avec les modélisations quantitatives	145
6.3	Les projets de questionnements socio-anthropologiques	146
6.3.1	Caractérisation des risques, chocs et vulnérabilités des ressources et plasticité humaine	146
6.3.2	Systématique des types de famille face aux chocs et aux vulnérabilités	146
6.3.3	Indicateurs sociaux de la désertification	146
6.4	Les projets de questionnements géographiques.....	147
6.4.1	Le modèle diffusion-accrétion.....	147
6.4.2	Cartographie de la main d'œuvre rurale	147
6.5	Hypothèses locales à tester	147
6.5.1	L'hypothèse de l'héritage coutumier comme facteur d'émigration, de rupture voire de radicalisation des jeunes au Sahel	147
6.5.2	L'hypothèse du creuset des identités amazonien.....	147
6.5.3	L'hypothèse « familles élargies » comme explication des rubanés	148
6.6	Conclusion partielle	148
7	Conclusion générale	149
	Bibliographie	151

Liste des Illustrations

Figure 1. Distribution spatiale des projets de recherche (direction et participation).....	14
Figure 2. Progression des citations (Google Scholar)	24
Figure 3. Usages et pratiques sur le territoire : Production agricole sur le territoire.	41
Figure 4. Couverture sanitaire reconstituée par auréoles de 15km autour des dispensaires recensés par ZADA.	42
Figure 5. Indicateurs de contraintes structurelles de l'élevage.	43
Figure 6. Programmation des rangs dans les familles pour les hommes et garçons, pour les femmes et filles. ...	44
Figure 7. Reconstitution de la croissance annuelle des surfaces cultivées et comparaison avec les reconstitutions par interpolation d'images aériennes	45
Figure 8. Coefficients de variation entre familles et répétitions.....	46
Figure 9. Reconstitution de l'occupation en surfaces cultivées sur Dantiandou (Fakara, Niger) de t=0 : 1930 à t=100 : 2030.	46
Figure 10. Evolution d'indicateurs environnementaux et socio- économiques sur les trois sites simulés	47
Figure 11. Evolution des parts des différents types de famille par site simulé.....	49
Figure 12. Organisation ethno-linguistique simplifiée du Sahel Haoussa-Kanuri	51
Figure 13. Photographies illustratives prises au Niger et au Sénégal, de 2000 à 2018.....	53
Figure 14. Reconstitution historique de l'occupation du territoire de Dayuma, province d'Orellana, Equateur... ..	56
Figure 15. Gradient de difficulté relative des transports sur le bassin de l'Oyapock : la route est devenue plus pratique que le fleuve.....	56
Figure 16. Perceptions des contaminations pétrolières et minières dans l'Oriente Amazonien (Equateur)	57
Figure 17. Perceptions des groupes ethniques et des identités alimentaires en Orient Amazonien (Equateur) et sur le bassin de l'Oyapock (Guyane française & Brésil).....	58
Figure 18. Principaux usages du territoire en Amazonie Equatorienne et sur le bassin de l'Oyapock (Guyane française & Brésil)	59
Figure 19. Reconstitution par simulation multi-agents de la colonisation de la parroquia de Dayuma.	60
Figure 20. Reconstitution spatiale par imagerie satellite de l'expansion des surfaces cultivées : Parroquia de Dayuma (Amazonie équatorienne) sur 32 ans (1982-2014).	60
Figure 22. Pollution atmosphérique simulée par SIG des provinces d'Orellana et Sucumbíos.	61
Figure 21. Effets conjoints des pollutions des rivières et des inondations sur le bassin versant de Pacayacu.	61
Figure 23. a) Modélisation de l'allocation agricole des terres sur la parroquia de Dayuma.....	62
Figure 23. Photographies prises en Guyane française et en Amazonie Equatorienne, de 2013 à 2019	64
Figure 25. Disposition des sites rubanés sur l'Europe du Nord.....	66
Figure 26. Reconstitutions de la fertilité des terres au début du Néolithique et des évolutions climatiques saisonnières (Température et Précipitations) sur le Néolithique	68
Figure 27. Faire un climat simplement ?	68
Figure 28. Composantes du système social.....	69
Figure 29. Règles socio-anthropologiques neutres pour la société rubanée.....	69
Figure 30. Propositions de pratiques de fertilisation et de sécurisation alimentaire permettant le maintien de l'hypothèse "champs permanents du système de production de la culture rubanée.	71
Figure 31. Autoécologie de deux espèces natives du Languedoc-Roussillon, le pin sylvestre et l'olivier sauvage selon 6 facteurs d'après l'European Atlas, la flore de Rameau et Baseflor.....	73
Figure 32. Regroupement en PFTs des 95 espèces ligneuses du Languedoc-Roussillon : Description et espaces des paramètres de survie et de croissance.	73
Figure 33. Pour la région du degré carré de Niamey, comparaison des résultats du ZADA et de la carte géomorphopédologique élaborée par l'IRD.	95
Figure 34. Aperçu des cartes de fonds pour différents ZADAs à la même échelle : les territoires sont de taille très variées. (de gauche à droite : Oriente (Equateur), Ferlo (Sénégal), Tillabéry (Niger), (Mornag (Tunisie), Oyapock aval, Oyapock amont, Luang Phabang (Laos).....	95
Figure 35. Méthodologie du Zonage à Dires d'Acteurs.	97
Figure 36. Aperçu du rendu de quelques cartes ZADA sur le même Orient Amazonien Equatorien (2013).	97
Figure 37. Distribution spatiale des enquêtes de type ZADA.....	99
Figure 38. Zones d'étude. De gauche à droite– Equateur, Guyane française & Sénégal	99

Figure 39. Perceptions de différents risques environnementaux sur trois terrains : Equateur, Laos et Tunisie..	102
Figure 40. Résultats du ZADA en Amazonie Equatorienne nord : a) Présence perçue des indigènes par les non-indigènes ; b) ; Perception de la qualité de la couverture en infrastructures publiques c) Perception par les non-indigènes d'un « problème indigène » ; d) Perception de la qualité des sols	104
Figure 41. Photographies de Zonages à Dires d'Acteurs sur différents terrains, dans l'ordre chronologique	106
Figure 42. L'Echelle de la participation (Arnstein, 1969).....	111
Figure 43. Progression du processus de formalisation, d'abstraction et d'organisation du système socio-écologique de l'orient Amazonien par les partenaires du projet MONOIL, pour identifier les variables caractérisant les acteurs à intégrer dans la modélisation	112
Figure 44. Formalisation par diagrammes d'activités UML des trois étapes successives du cycle cultural requérant de la main d'œuvre, chacune correspondant à une séquence d'évaluation et d'action.	113
Figure 45. Différences entre a) précis, b) exact, c) exact et précis	115
Figure 46. Diagramme de classe UML (Unified Modelling Language) du modèle PASHAMAMA, avec les deux modules biophysique et socio-économique.....	115
Figure 47. La MASSTABA de dépendances	119
Figure 48. Reconstitution de l'environnement biophysique (climat + couverture végétale) pour OBRESOC	121
Figure 49. Intrication des composantes d'un terroir : une architecture d'entités emboîtées et en interaction ..	123
Figure 50. Méthodologie de modélisation de terrain : du régional à l'individuel, du qualitatif au quantitatif..	124
Figure 51. Méthodologie de construction d'un modèle multiagent, adapté de Drogoul et al. (2000).....	134
Figure 52. Résultats de l'analyse de sensibilité sur certains paramètres sélectionnés comme illustratifs.	136
Figure 53. Combinaison de paramètres choisis, proposée pour le modèle OBRESOC, avec ainsi 108 864 scénarios possibles	139
Figure 54. Photos illustrant les réunions de la démarche ARDIQS.	140
Figure 55. « Scénarios » ou groupes de variables obtenues par démarche ARDIQS qui, se combinant, seront autant de futurs possibles pour le modèle PASHAMAMA de l'Orient Amazonien Equatorien.....	140

Liste des Tableaux

Tableau 1. Répartition des encadrements selon le niveau académique.	11
Tableau 2. Répartition des projets acceptés et rejetés au cours du temps.	14
Tableau 3. Présentation des projets non retenus par année.....	17
Tableau 4. Organisme et type d'appel des expertises scientifiques réalisées.	22
Tableau 5. Revues, conférences et années des évaluations d'article scientifiques.	23
Tableau 6. Types et années des publications scientifiques produites.	23
Tableau 7. Evolution de l'étendue enforestée dans le bassin versant de la Parroquia de Dayuma : comparaison entre données de couverture du territoire par imagerie satellite et sorties du modèle PASHAMAMA	60
Tableau 8. Critères de qualité de l'indicateur ou de la donnée.	81
Tableau 9. Comparaison des méthodes du terrain et d'enquête dans le contexte du Niger pluvial	98
Tableau 10. Évolutions de l'outil ZADA au long des utilisations : adaptations aux contextes, aux questions de recherche et intégration d'innovations de traitement des données	100
Tableau 11. Validité des combinaisons de proximités géographiques et temporelles par analogie de données.	123

Liste des Acronymes

AMMA :	“Méta-programme” Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
ANR :	Agence Nationale de la Recherche
ANR MONOIL :	Monitoring environnemental, santé, société et pétrole en Equateur
ANR OBRESOC :	Observatoire Rétrospectif des Sociétés néolithiques
ARDI-QS :	Acteurs, Ressources, Dynamiques, Interactions –Questions, Scénarios
CASTAGNE :	CARtographie Sociétale des Territoires en AntaGoNisme Environnemental Occitanie
CDU :	Contrat Doctoral universitaire
CDU MADA :	Modèles Multi-Agent À Dires d’Acteurs
CDU PASHAMAMA:	Prospective Apprehension by Scenarios-based Hypotheses & Multi-Agent Modeling of Amazon
CDU SENESCYT:	Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación
CIRAD :	Centre International de Recherche en Agriculture pour le Développement
CGIAR:	Consultative Group on International Agricultural Research
CGIAR CIFOR:	Centre International en FORestierie
CGIAR ICRAF:	International Center for Research on Agroforestry
CGIAR ICRISAT:	International Crop Research Institute for Semi-Arid Tropics
CGIAR ILRI:	International Livestock research Institute
CNEARC :	Centre National d’Etudes Agronomiques des régions Chaudes
CNRS :	Centre National de la Recherche Scientifique
CNRS INEE :	Institut d’Ecologie et d’Environnement
CNRS INSU :	Institut des Sciences de l’Univers
CNRS INSHS :	Institut des Sciences Humaines et Sociales
CORMAS :	COMmon Resources Multi-Agent System
CSFD :	Comité Scientifique Français contre la Désertification
DEEP :	D’abord Exact, Ensuite Précis
DESS :	Diplôme d’Etudes Supérieures Spécialisées
DGCD :	Direction Générale de la Coopération au Développement
DGCD PAD :	Projet Aide à la Décision
DGCD PAD SIMSAHEL :	PAD Simulations au Sahel
DIAT :	Diplôme d’Ingénieur Agronome Tropicaliste
ECRIS :	Enquête Collective Rapide d’Identification des conflits et des groupes Stratégiques
ENIT :	École Nationale d’Ingénieurs de Tunis
ERC RISE:	European Research Council Research and Innovation Staff Exchange
ERC RISE INSA:	Investigating Nitrogen Systems in Africa
GAMA:	GIS Agent-based Modeling Architecture
GDRi :	Groupe de recherche international - Sud
GDRi O-LIFE :	Observatoire Libano-Français de l’Environnement
GIS :	Groupes d’Intérêt Scientifique
IDA :	Institut des Amériques
INP :	Institut National Polytechnique de Toulouse
IRD :	Institut de Recherche pour le Développement
ISA :	Institut Supérieur Agronomique Chott-Meriem
KEV :	Key Environmental Variables
LABEX :	Laboratoire d’Excellence
LABEX CEBA :	Centre d’étude de la biodiversité amazonienne
LABEX DRIIHM :	Dispositif de Recherche Interdisciplinaire sur les Interactions Hommes-Milieux
LABEX SMS :	Structuration des mondes Sociaux
LBK :	Linear Bandkeramik
MARP :	Méthode Accélérée en Recherche Participative
MASSE :	Modélisation Multi-Agent Spatialisée des Socio-Ecosystèmes
MISTRALS:	“Méta-programme” Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales

MISTRALS PALEOMEX :	Paleo Mediterranean eXperiment
MISTRALS SICMED :	Surfaces et Interfaces Continentales en Méditerranée
MISTRALS SICMED PSI	Programme Soutiens Indicateurs ou IMESSOUENE (Indicateurs & MEtriques des SOUtenabilités ENvironnementales)
MSHS-T :	Maison des Sciences de l'Homme et de la Société de Toulouse
MSHS-T GHIVARO:	Geografía Integrativa de Vulnerabilidades Humanas, Ambientales y Riesgos en Oriente
OHM :	Observatoire Hommes-Milieux
OHM FERLOZAD :	Cartographie du FERLO par Zonage à Dires d'Acteurs
OHM FEZOADA :	Formalisation/ Evaluation par Zonage de l'Oyapock A Dires d'Acteurs
OHM MECHOUI :	Modélisation Exploratoire Croisée Haut-Vicdessos : Occupation, Usages et Interactions
ONG :	Organisation Non-Gouvernementale
UN :	United Nations = ONU : Organisation des Nations Unies
ONU FAO:	Food and Agricultural Organization
OSPHYT :	Objet, Sujet, Problématique, Hypothèse, Test
OSS :	Observatoire du Sahara et du Sahel
OSS-ROSELT :	Réseau d'Observatoires de la Sécheresse et de l'Environnement à Long Terme
PEPS :	CNRS Projets Exploratoires Premier Soutien
PEPS ATIMODIS :	Ateliers Interdisciplinaires de Modélisation des Interactions Sociales
PEPS MIASMES :	Maladies liées aux Inondations : Approche Sociospatiale MEkong et Sông-Hông
PEPS SOLIDER :	Solidarité face au risque environnemental
PFT :	Plant Functional Types
SIG :	Système d'Information Géographique
SHS :	Sciences Humaines et Sociales
SMA, SMAS :	Système Multi-Agent, Système Multi-Agent Spatialisé
SSER :	Systèmes Socio-Ecologiques Ruraux
STAE RTRA :	Fondation STAE « Sciences et Technologies de l'Aéronautique »
STAE RTRA MAELIA:	Multi-Agents for Environmental Norms Impact Assessment
UCL :	Université Catholique de Louvain
UCL ENGE :	Environnement et Géomatique
UCL GERU :	Génie Rural
UT2J :	Université Toulouse 2 Jean Jaurès
UMR :	Unité Mixte de Recherche
UMR AASPE :	Archéozoologie, Archéobotanique, Sociétés, pratiques et Environnements (code 7209)
UPR CEH :	Unité Propre de Recherche Centre d'Etudes Himalayennes (code 299)
UMR DYNAFOR :	DYNAMiques et écologie des paysages agroFORestiers (code 1201)
UMR CESBIO :	Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (code 5126)
UMR ECOLAB :	Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement (code 5245)
UMR GEODE :	Géographie de l'Environnement (code 5602)
UMR GET :	Géosciences Environnement Toulouse (code 5563)
UMR HSM :	HydroSciences Montpellier (code 5569)
UR GREEN :	Unité de Recherche GREEN Gestion des Ressources renouvelables et Environnement
UMR IRIT :	Institut de recherche en Informatique de Toulouse (code 5505)
UMR ISEM :	Institut des Sciences de l'Evolution (code 5554)
UMR SPHERE :	Sciences, Philosophie, Histoire (code 7219)
ZADA :	Zonage A Dires d'Acteurs

2 Présentation des activités scientifiques

2.1 Curriculum vitae

Etat civil / Renseignements personnels

SAQALLI Mehdi

Date de naissance : 03 / 11 / 1973

Pacsé, 2 enfants (13 ans, 2 ans)

Adresse

38bis rue Henri Bonis, 31100 Toulouse

Téléphone : 05 61 50 24 40 / 07 67 15 46 40

@ : mehdi.sqalli@univ-tlse2.fr

Affiliation

Centre National de la Recherche Scientifique

Chargé de Recherches 1ère classe (section 39) catégorie devenue Chargé de Recherche de Classe Normale

Date entrée au CNRS : Octobre 2011

Laboratoire GEODE UMR 5602 CNRS

Université Toulouse Le Mirail

5 allée Antonio Machado

31058 Toulouse Cedex

Diplômes universitaires

1998 **DESS Développement agricole** IEDES Université Paris 1 Panthéon Sorbonne

2002 **Diplôme d'Ingénieur Agronome Tropicaliste** (DIAT) CNEARC, devenu depuis SupAgro Montpellier Institut des Régions Chaudes)

2008 – **Doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique** : Université catholique de Louvain Populations, Farming systems & Social transitions in Sahelian Niger: An Agent-based Modeling Approach

Parcours professionnel

2011 - ... : Chargé de Recherches 1ère classe CNRS – GEODE UMR 5602 CNRS

2010-2011 : Ingénieur de recherche ANR OBRESOC : UR REEDS Université Versailles St-Quentin-en-Yvelines

2009-2010 : Contrat postdoctoral RTRA STAE Programme MAELIA – GET UMR 5562

2008 : Consultant CIFOR (Centre International en Foresterie).

2003-2008 : Assistant technique de la coopération belge au Niger (DGCD) – Université catholique de Louvain

2.2 Activités d'encadrement de la recherche et d'enseignement

Mes activités d'administration et d'animation de la recherche m'ont amené à la formation à et par la recherche, ainsi qu'à l'encadrement d'étudiants en master 1 et en master 2, en contrat de recherche doctoral et postdoctoral. Soucieux de leur devenir, dans la recherche ou hors celle-ci, en particulier du côté des organismes et institutions de développement, il m'importe de leur proposer des sujets scientifiques novateurs, certes en adéquation avec leur profil, qui s'insèrent dans les projets de recherches mais se positionnant dans des approches de préférence « à risque » avec des approches volontiers nouvelles. Ainsi, les recherches des étudiants que j'ai pu encadrer ou que j'encadre actuellement, s'insèrent toutes dans cette trame des approches de terrain à la formalisation des principes épistémologiques de modélisation quali-quantitative.

Dès lors que les conditions le permettent, un sujet de recherche est proposé à des étudiants motivés, suivant une approche qui se veut limitée mais de qualité. Mon investissement à propos de leur encadrement est à la hauteur de l'exigence demandée dans leur travail. En particulier, j'essaie de lutter contre la tendance bien compréhensible mais pénalisante à long terme de l'étudiant.e à se rabattre sur sa « zone de confort », à savoir son domaine de compétences sur un territoire bien débroussaillé : ainsi, sortir de la géostatistique de phénomènes visibles par imagerie satellitaire comme la déforestation pour des étudiants SIG. Les données ci-dessous synthétisent mon activité d'encadrement. Il est à noter que :

- le post-doctorant encadré a été recruté en tant que Chargé d'étude à TerraNis, une entreprise portée par l'Union Européenne pour la valorisation des données satellitaires auprès des universités ;
- L'étudiant ayant fini sa thèse bénéficie d'un deuxième contrat postdoctoral d'un an en Équateur ;

2.2.1 Enseignements en master

Mon activité d'enseignement se concentre sur l'Université de Toulouse. Il s'agit principalement d'interventions en Master 2 visant à promouvoir, diffuser et initier aux méthodes d'enquête de terrain, la modélisation multiagent spatialisée. Suivant les années, cela représente en moyenne de 30h à 45h par an d'enseignement.

- Université Toulouse 2 Jean Jaurès L3 : Géographie Afriques Sub-Sahariennes : une histoire par les cartes. 2h en 2019.
- Université Toulouse 2 Jean Jaurès Master 1 Géographie Environnement et Paysage UE 705 : Conventions Internationales : Biodiversité, Désertification, Changements climatiques. 4h en 2019.
- Université Toulouse 2 Jean Jaurès Master 1 Géographie Environnement et Paysage UE 803 : Construire une méthodologie de recherche sur le terrain à l'interface Sciences sociales et Sciences Biophysiques : exemples de travaux en pays du Sud. 4h de 2018 à 2019.
- Université Toulouse 2 Jean Jaurès Master 2 Géographie Environnement et Paysage UE 902 : Zonages A Dires d'Acteurs : Méthodes et usages. 4h de 2018 à 2019.
- Université Toulouse 2 Jean Jaurès Master 2 Géographie Environnement et Paysage UE 903 : Négociation entre acteurs, cadre formel & étude de cas. 4h de 2017 à 2019.
- Université Toulouse 2 Jean Jaurès Master 2 Géographie Environnement et Paysage UE 904 : Modélisation Multiagent. 20h de 2013 à 2019.
- Centre Universitaire Jean-François Champollion Master 2 Gestion Sociale de l'Environnement : Zonages à Dires d'Acteurs en pratique. 6h de 2017 à 2019.

2.2.2 Formations

- Participation à l'école thématique SCEMSITE « SCEnarisations, Modélisations et Simulations spatialisées pour le Territoire », Puy-Saint-Vincent 3-11 mars 2016 : 5h
- Participation à l'école modélisation Netlogo de l'UMR Géosciences Environnement Toulouse 12-13 décembre 2011 ; 2-3 décembre 2012: 2* 5h

2.2.3 Encadrements Postdoctorats, doctorats et masters

Tableau 1. Répartition des encadrements selon le niveau académique.

Supervision de Postdoctorat	Co-Supervision de Doctorat	Master 2	Master 1
1	1 achevée, 4 en cours	10	8

Postdoctorats

1. **MAESTRIPIERI Nicolas**, 2013, (1 an) Projet ANR MONOIL. GEODE UMR 5602 CNRS, Formalisation des bases de données spatiales du projet ANR MONOIL, Recruté CDI comme Ingénieur d'études à TerraNIs (Observation de la Terre pour l'agriculture, la viticulture, l'environnement et la gestion des territoires), sur le projet Agence Spatiale Européenne de Coopération avec les Universités.

Thèse(s) soutenue(s)

1. **Codirection : DURANGO-CORDERO Juan**, 2015-2018. "*Impacts environnementaux de l'exploitation pétrolière en Amazonie équatorienne : de l'étude spatiale de la vulnérabilité à l'évaluation du risque*". Université Toulouse 3. Directeur : A. Elger (UPS) ; Co-directeur : M. Saqalli. **Recruté comme Maître assistant à l'Universidad San Francisco de Quito.**

Thèses en cours

1. **Codirection : KACED Doryan**, 2017-2021. "*Modèles Multiagent À Dires d'Acteurs*". Université Toulouse 1 Capitole et Université Toulouse 2 Jean Jaurès. Directeur : B. Gaudou (UT1) ; Co-directeur : M. Saqalli
2. **Codirection : MEJEAN Romain**, 2017-2021. "Modélisation rétrospective des dynamiques environnementales et sociales de la région amazonienne en Equateur : couplage de modèles réseaux d'acteurs et spatio-temporels". Université Toulouse 2 Jean Jaurès. Directeur : M. Paegelow (UT2J) ; Codirecteur : M. Saqalli
3. **Codirection : BOUSSETTA Amira**, 2014-2022. "*Ruralité et système de production pour les paysages miniers Cas du Jebel Ressass*". Doctorat ISA Chott-Meriem (Tunisie), Directeur : H. Rejeb (ISACM) ; Co-directeur : M. Saqalli

Masters

Master 2

1. **IGUENAD Zakari (2020)**. Reconstitution du couvert végétal potentiel du Languedoc-Roussillon avec application pour le climat actuel et certaines étapes du Néolithique (programme MISTRALS-PALEOMEX). Codirection M. Saqalli, J. Azuara.
2. **CAHIERRE Marianne (2019)**. Fonctions de croissance Couverture végétale - Facteurs Environnementaux Locaux pour un modèle dynamique de la couverture végétale du Néolithique en Languedoc-Roussillon (programme MISTRALS-PALEOMEX). Codirection M. Saqalli, O. Peyron, J. Azuara.
3. **ROJAS CIFUENTES Cristian (2018)**. Perceptions du territoire autour du fleuve Oyapock, entre Amazonie du Brésil et de Guyane française par enquêtes par Zonage à Dires d'Acteurs (projet FEZOAD2 OHM Oyapock). Co-direction M. Saqalli, J. Fozzani
4. **PERRIER Flavia (2018)**. Cartographie des conflits environnementaux/ d'aménagement en région Midi-Pyrénées. Projet GEODE CASTAGNE Direction L. Sébastien ; Encadrement : M. Saqalli
5. **ALI MOUSSA Tohir (2017)**. Etat des lieux des données disponibles et des données nécessaires pour la reconstitution multi-agents spatialisée de l'occupation néolithique en Languedoc-Roussillon (programme PALEOMEX). Codirection M. Saqalli, J.-M. Carozza
6. **CHAPOTAT William (2016)**. Simulation en automates cellulaires des exploitations agricoles et ménages en Amazonie Equatorienne, face aux contaminations pétrolières, aux dynamiques économiques et aux politiques publiques. M2 GEP. Codirection M. Saqalli, M. Paegelow
7. **HOUSSOU Lionel (2016)**. Simulation SMA du comportement des ménages en Amazonie Equatorienne, et des politiques publiques. M2 Informatique. Codirection M. Saqalli, B. Gaudou
8. **MORIN Lucie (2015)**. Analyse des systèmes agraires, de production & d'activité des ménages des parroquias de Dayuma et Pacayacu, Oriente Equatorien. M2 IRC (SupAgro Montpellier). Direction M. Saqalli
9. **JOURDREN Marine (2013)**. Vivre près d'une rivière : des eaux troubles au quotidien ou des eaux qui troublent le quotidien ? M2 IEP Toulouse. Codirection S. Becerra, M. Saqalli
10. **HAMIDOU Nouhou (2005)** Analyse des activités des ménages agricoles du Fakara au Niger : cas de trois villages. M2 DIAT CNEARC. Direction : M. Saqalli

Master 1

1. **TALBI Younes (2020)** Analyse géostatistique des conflits environnementaux/ d'aménagement en région Occitanie. Projet GEODE CASTAGNE Codirection M. Saqalli, F. Blot
2. **IOPIE Raoul (2019)** Perceptions du territoire du Ferlo Sénégalais par formalisation des résultats des enquêtes par Zonage à Dires d'Acteurs. Projet OHM TESSÉKÉRÉ Codirection M. Saqalli, A. Diallo
3. **CLAVARD Robin (2018)** Cartographie des conflits environnementaux/ d'aménagement en région Occitanie. Projet GEODE CASTAGNE Codirection M. Saqalli, F. Blot
4. **PAEZ CEVALLOS Maria (2017)** Perceptions de l'environnement de l'Amazonie Equatorienne par les acteurs locaux par Zonage à Dires d'Acteurs. Codirection M. Saqalli, L. Maurice.
5. **RICHA Aurélien (2017)** Simulation sociale à base d'agents du comportement microéconomique des ménages ruraux en Amazonie Equatorienne, face aux contaminations pétrolières, aux dynamiques économiques et aux politiques publiques. Codirection M. Saqalli & B. Gaudou
6. **de MEYER Clément (2017)** Réalisation d'un atlas des perceptions de l'environnement de l'Amazonie Equatorienne par formalisation des résultats des enquêtes par Zonage à Dires d'Acteurs. Direction M. Saqalli
7. **JOURDREN Marine (2012)** Gestion de l'eau par les populations du bassin de la Nam Khan (Laos). M1 IEP Toulouse. Codirection S. Becerra (CNRS UMR 5563 GET) et M. Saqalli
8. **GUIFFANT Nadia (2005)** Élaboration d'unités homogènes pour la cartographie des potentialités pastorales à l'aide de l'imagerie satellitaire dans le site d'étude de Gabi-Madarounfa. M1 SIG Université Louis Pasteur (Strasbourg). Codirection D. Bakary (AGRHMET) et M. Saqalli

Encadrement universitaire d'étudiants

1. **Master 2 GSE-VRT : MILLAN Mathilde (2020)** : Évaluation de la biomasse raméale exploitable dans un système agroforestier à partir d'acquisitions LiDAR : Reconstruction de l'architecture des arbres à partir de TLS et recherche de lois allométriques. Encadrement M. Saqalli
2. **Master 2 GAED : LUTRAND Solenne (2020)** La Halle de la Machine : étude de l'impact territorial d'une structure culturelle. Encadrement M. Saqalli
3. **Master 1 GAED : VEYSSI Anouk (2020)** La transition agricole dans la région de Marrakech : Etat des lieux et leviers d'actions pour le projet de « Ferme Verte de l'Innovation et de la Solidarité » par l'association AMCIDD à N'zalet laadem, province de Ben Guerir. Encadrement M. Saqalli
4. **Master 2 GSE-VRT : HAREB Slimane (2019)** Structuration d'une base de données SIG et analyse thématique du bassin versant du Guiers pour la protection des milieux aquatiques et la gestion des ressources piscicoles. Encadrement M. Saqalli
5. **Master 2 UCL : MINET Julien (2007)**. Influence de la dispersion du parcellaire sur la gestion du risque climatique au Fakara, Niger. Bio-ingénieur, UCL, Louvain-la-Neuve, Belgique. Codirection D. Bodson (UCL) et M. Saqalli.
6. **Master 2 UCL : ALI ZENE Haoua (2006)**. L'association de microfinance féminine Assusu-Ciigaba INMF. DES en Economie et Sociologie Rurales, UCL, Louvain-la-Neuve, Belgique. Codirection D. Bodson (UCL) et M. Saqalli.

Jury universitaire et comité de thèse d'étudiants

1. **Doctorat BAISARI Rebecca, 2020-2023**. "Circulation des connaissances environnementales au Liban ; O-Life un observatoire aux frontières entre les enjeux de sociétés ". Université Paris-Est Marne-la-Vallée. Directeur : R. Arvanitis (IRD) ; Comité de thèse.
2. **Doctorat JUTEAU-MARTINEAU Guilhem** (Thèse soutenue 2013-2019) « Quand les instruments de participation reconduisent l'incapacité politique : le cas de la régulation sociale et environnementale des activités pétrolières en Equateur ». Directrice de thèse : Mme Sylvia Becerra (CNRS) ; Comité de thèse.
3. **Master 2 GSE-VRT : GUIRAUD Anaïs (2020)** Méthodologie pour la mise en place d'un Tiers Lieu FabLab Hautes-Terres d'Oc, Lacaune. Jury
4. **Master 2 GSE-VRT : DUCOURNEAU Lisa (2019)** L'Indication Géographique de la grenade Sefri Ouled Abdellah au Maroc. Jury
5. **Master 2 GAED : RAFANOHARANA Narindra (2018)**. La mutualisation des connaissances entre collectivités territoriales : l'avenir de la prévention des déchets. Jury

6. **Master 1 GAED : COMPAGNET Chloé (2017)** Réflexions sur le rôle de la modélisation d'accompagnement : Exemple d'application en environnement et hydro-morphologie. Jury

2.3 Programmes de recherche

Tableau 2. Répartition des projets acceptés et rejetés au cours du temps.

Projets		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	TOTAL succès
Porteur	succès	0	0	1	0	1	1	2	5	3	0	1	13
	rejet			1	3	4	2	5	2	3	1	0	21
Participant	succès	1	1	1	1	3	0	2	2	1	1	0	13
	rejet			2	2	1	6	2	1	0	0	0	14
													26/61=42%

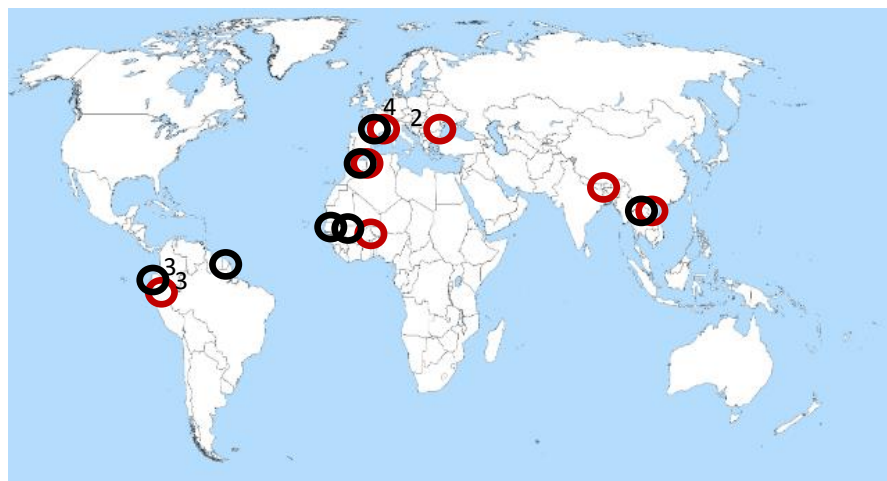


Figure 1. Distribution spatiale des projets de recherche (direction et participation)

● Projets retenus
● Projets non retenus

2.3.1 Direction et coordination de projets de recherche

2020

2020 : Lancement et Codirection PALEOMEX-Biomes : Reconstitution du couvert végétal potentiel du Languedoc-Roussillon avec application pour le climat actuel et certaines étapes du Néolithique (programme MISTRALS-PALEOMEX) : M. Saqalli, Nathalie Combourieu-Nebout

=> Montant obtenu via cet appui :

=> 4 000€

2019

2019 : Participation et représentant GEODE H2020-MSCA-RISE-2019 INSA (Investigating Nitrogen in Africa) : Tâche 3.3. Direction : C. Delon, UMR AERO.

2019 : Lancement et Codirection PALEOMEX-FTP : Elaboration de Types Fonctionnels de Plantes pour la reconstitution du couvert végétal potentiel du Languedoc-Roussillon avec application pour le climat actuel et certaines étapes du Néolithique (programme MISTRALS-PALEOMEX) : M. Saqalli

=> Montant obtenu via cet appui :

=> 5 000€

2018

2018 : Lancement et Codirection CASTAGNE : Cartographie Sociétale des Territoires en AntaGoNisme Environnemental en Occitanie : M. Saqalli, L. Sébastien (GEODE) Appel GEODE + SFE2 :

=> Montant obtenu via cet appui :

=> 4 900€

2018 : Lancement et Direction FEZOAD2 : Formalisation et Evaluation de l'occupation du territoire par Zonage du bassin de l'Oyapock A Dires d'Acteurs (ZADA). M. Saqalli : OHM Oyapock (Guyane française & Brésil) :

=> Montant obtenu via cet appel d'offres :

=> 5 000€

2017

2017 : Lancement et Direction du Projet DRIIHM FERLOZAD (Observatoire Homme-Milieux Tessékéré) : Evaluation de l'utilisation des ressources naturelles et institutionnelles affectant la santé publique dans le Ferlo (Sénégal) : approche par un Zonage à Dires d'Acteurs.

Le projet FERLOZAD est motivé par la nécessité de se représenter ce territoire (certes homogène mais pas indépendant du reste du pays), à savoir dans son utilisation, en particulier agricole mais surtout pastoral et dans son organisation institutionnelle et dans l'empreinte de l'appui de l'État Sénégalais, et en particulier le volet vital de l'infrastructure sanitaire, et enfin, dans les transformations qu'il subit sur ces aspects agricoles et institutionnels. Les Zonages à Dires d'Acteurs ou ZADA permettent de rendre compte à l'échelle régionale de ces points de manière « quali-quantitative », à savoir dont l'information recueillie est positionnée géographiquement, renseignée quantitativement mais dont le choix des critères pertinents, leur priorité est choisie qualitativement par les acteurs locaux. Cela permet de répondre au verrou méthodologique de la difficulté de couvrir un territoire étudié dans sa globalité géographique, permettant de remettre en perspective les contraintes du territoire du Ferlo par rapport aux territoires l'englobant et par là de replacer le Ferlo dans la sphère d'usage de ses habitants et de faire apparaître les critères qui sont perçus localement comme caractérisant au mieux ce même territoire;

=> Montant obtenu via cet appel d'offres : => 3 500€

2017 : Lancement et Direction du Projet DRIIHM FEZOADA (Observatoire Homme-Milieux Oyapock) : Formalisation et Evaluation de l'occupation du territoire par Zonage du bassin de l'Oyapock A Dires d'Acteurs :

Il s'agit de répondre au verrou méthodologique de l'emprise spatiale, en explorant les caractéristiques du bassin du fleuve Oyapock, transfrontalier entre territoire français et brésilien et par là de replacer le bassin et la zone du pont dans la sphère d'usage de ses habitants. Le ZADA fait apparaître les critères qui sont perçus localement comme caractérisant au mieux ce même territoire, hiérarchiser ces variables entre elles, comme par exemple l'importance relative de l'accès aux infrastructures de santé et perception du caractère sain d'un territoire, entre les enjeux autour des pratiques agricoles, sylvicoles et savoir locaux, identifier avec les acteurs du développement du territoire les futurs possibles (et possiblement impactant différemment le territoire tel que décrit dans la première étape ZADA).

=> Montant obtenu via cet appel d'offres : => 6 950€

2017-2020 : Projet PASHAMAMA Contrat Doctoral Universitaire (CDU) Université Toulouse 2 Jean Jaurès : Prospective Apprehension through Scenarios-based Hypotheses and Multi-Agent Modeling of Ecuadorian Amazon / Modélisation rétrospective des dynamiques environnementales et sociales de la région amazonienne en Equateur : couplage de modèles réseaux d'acteurs et spatio-temporels. Lancement et Codirection de Doctorat Romain Méjean : M. Saqalli & M. Paegelow (UMR 5602 GEODE)

=> Equivalent Montant obtenu via cet appel d'offres : => 100 000€

2017-2020 : Projet MADA Financement Université Toulouse 1 Capitole / Région Occitanie

Lancement et Codirection Co-Directeur de thèse de Doctorat Doryan Kaced : Modèles Multi-Agent À Dires d'Acteurs. Codirection : M. Saqalli & Benoit Gaudou (Uté Toulouse Capitole 1) : APR Région Occitanie/Université Toulouse Capitole

=> Equivalent Montant obtenu via cet appel d'offres : => 100 000€

2017 : Lancement et Codirection Sociogeographic modeling PALEOMEX-Languedoc-Roussillon (France). M. Saqalli & JM Carozza (LIENNS Université la Rochelle) :

=> 3 200€

2016

2016 : Lancement et Direction GHIVARO : Geografía Integrativa de las Vulnerabilidades Humanas y Ambientales y de los Riesgos en el Oriente : M. Saqalli : MSHS-T 2015 Environnements, risques, vulnérabilités + Observatoire Midi-Pyrénées budget Environnement & Santé + Institut des Amériques

L'objectif de ce projet est de caractériser les vulnérabilités humaines et environnementales recensées dans la région Amazonienne de l'Equateur. Ce territoire encore largement forestier, et présentant l'une des biodiversités les plus élevées au Monde, est l'objet d'une exploitation de ses gisements pétroliers depuis 50 ans, entraînant des conséquences environnementales importantes : défrichements pour une colonisation agricole, contaminations pétrolières affectant le territoire et ses habitants. Ce projet se base sur un Système d'Informations Géographique qui sera achevé fin 2015 et qui intègre spatialement l'ensemble des données

produites et recueillies, à la fois sur le plan environnemental (relief, hydrologie, pédologie, couverture végétale, sources de contamination pétrolière), mais aussi socio-économique (infrastructures médicales et sanitaires, distribution de la population, des rentabilités différentielles des activités économiques selon les groupes sociaux et des administrations). A côté d'un état des lieux des aléas sur base de ces données disponibles, il s'agit dans ce projet de développer un état des lieux spatialisé des vulnérabilités du territoire et des populations qui y résident.
=> Montant obtenu via ces trois appels d'offres : => 7 100€

2016 : Participation au Projet INVASCAPE : Paysages des indésirables, perception et qualification des espèces invasives dans les enjeux liés aux corridors écologiques.

Direction : S. Guillaume (CNRS GEODE UMR 5602) 2016 : Appel à Projets de Recherche LABEX DRIIHM Campagne 2016 *OHM - ROHM*

Objectifs : Mieux comprendre la diversité des modalités de qualification des espèces invasives par les acteurs locaux ; Mettre en évidence les paradoxes sur la biodiversité en lien avec l'évolution des territoires et des habitats, grâce à une approche croisée considérant la construction des espaces et des territoires sur la courte et longue durée ; Tester une méthodologie qui devra pouvoir être appliquée ultérieurement dans différents pays, notamment en Inde, indépendamment des différences de cultures et de langage

=> Montant obtenu via cet appel d'offres : => 5000€

2015

2015 : Lancement et codirection du Projet MECHOU1 2 : Modélisation Exploratoire Croisée du Haut-Videssos : reconstitution des dynamiques spatiotemporelles de l'Occupation du territoire, des Usages et des Interactions.

Direction : M. Saqalli, F. Mazier (CNRS GEODE UMR 5602) 2015 : Appel à Projets de Recherche LABEX DRIIHM Campagne 2015 *OHM - ROHM*

Un Modèle multiagent Spatialisé, à confronter avec le premier modèle conceptualisé dans MECHOU11, modélise sur le temps rond (une année) et le temps long (la période 1800-2000) le fonctionnement des troupeaux sur un territoire reconstitué, mais aussi les interactions entre ces troupeaux et la végétation pâturée (écologie pastorale & forestière). Ce projet s'est heurté aux contraintes médicales du co-porteur.

=> Montant obtenu via cet appel d'offres : => 3 500€

2014

2014-2017 : Financement SENESCYT : Co-Directeur de thèse de Doctorat Juan Durango Cordero

Impacts socio-environnementaux de l'Exploitation pétrolière en Amazonie Equatorienne : de l'étude spatiale diachronique à des modèles prospectifs de l'évolution des territoires. Codirection : A. Elger (ECOLAB) & M. Saqalli
=> Equivalent Montant obtenu via cet appel d'offres : => 100 000€

2014 : Participation au projet PEPS Interdisciplinaires 2014 Projet PEPS SOLIDER Solidarité face au risque environnemental. Direction : M. Gaille (SPHERE UMR 7219)

Ce projet est d'abord une série de réunions entre chercheurs travaillant sur la vulnérabilité face au risque environnemental. Chacune de ces réunions, sur deux jours, est une occasion d'échanger sur les notions de vulnérabilité mais aussi sur l'épistémologie et les méthodologies à mobiliser pour des études sur ce genre d'objet scientifique

=> Budget Total du projet : => 9 000 €

2014 : Participation au projet PEPS Interdisciplinaires 2014 Projet PEPS ATIMODIS Ateliers Interdisciplinaires de Modélisation des Interactions Sociales. Direction : P. Ramirez (Centre d'Etudes Himalayennes, UPR 299)

Ce projet est également une série de réunions entre chercheurs anthropologues et modélisateurs sociaux sur des sujets anthropologiques particuliers, les connexions entre acteurs par mariages avec un cas particulier, celui de trois ethnies au Népal qui, il y a environ 200 ans, se mariaient selon un schéma ternaire (A=>B=>C=>A). CE projet a permis la mise en place du dépôt du projet homonyme sur l'appel ANR générique.

=> Budget Total du projet : => 7 000 €

2014-2018 : Projet ANR MONOIL Monitoring environnemental, santé, société et pétrole en Equateur, Responsable de tâche et représentant d'un des 7 partenaires. Codirection : S. Becerra & L Maurice CNRS GET UMR 5563)

Le projet transdisciplinaire MONOIL porte sur la caractérisation scientifique de la vulnérabilité humaine aux changements environnementaux induits par l'activité pétrolière en Equateur. Son objectif principal est d'améliorer la compréhension, le suivi, la réduction et la prévention des contaminations pétrolières et de leurs impacts sur la société et sur l'environnement pour permettre la co-construction de stratégies de réduction de cette vulnérabilité ou d'adaptation écologiquement durables, économiquement viables, sociologiquement adaptées et politiquement pertinentes. Plus spécifiquement, MONOIL évalue: 1/la contamination environnementale en deux sites d'étude en Amazonie et sur le site de la raffinerie d'Esmeraldas, 2/ les impacts sur le développement socioéconomique des territoires pétroliers, en la replaçant dans le cadre plus large de l'impact de l'activité pétrolière sur le développement des territoires concernés, 3/les vulnérabilités et dispositions sociétales pour y faire face à différentes échelles d'action (nationale, régionale, « paroissiale », familiale) et 4/ à développer des solutions techniques et organisationnelles concrètes pour y répondre. Je suis co-porteur de deux tâches sur 5 et suis chargé de l'intégration de l'ensemble des informations au sein d'un modèle automate cellulaire puis Multi-agent mais aussi de l'aspect systèmes agraires et systèmes de production qui caractérise l'activité économique de la population rurale de cette région.

=> Budget Total du projet : 861 000 € __ Budget GEODE : => 73 000 €
(dont un chercheur contractuel en postdoctorat (12 mois) basé au sein de l'unité GEODE).

2013

2012

2012 : Lancement et codirection du projet INEE PEPS Inégalités écologiques MIASMES : Maladies liées aux Inondations : Approche Sociospatiale sur les affluents du MEkong et du Sông-Hồng (Fleuve Rouge)

=> Budget Total du projet : => 9,600 €

2012-2014 Programme MISTRAL SICMED COMETES Contaminations Métalliques en Tunisie : Environnement et Santé Direction : M. Munoz (GET UMR 5563) CMCU 2009-2011/2011-2013 ; Programme Hubert Curien UTIQUE (2012-2013) ; ACI IRD (2013) Direction : P. Doumas (Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes UMR5004) programme SICMED Contaminants métalliques

Ce programme consiste en la mise en place d'un réseau de chercheurs de part et d'autre de la Méditerranée et plus spécifiquement France, Tunisie et Maroc sur l'enjeu des contaminations métalliques provenant des anciennes mines de la Société Peñarroya (en particulier Pb et Cd). Une mission ZADA (voir projet MIASMES) a ainsi été financée, en vue de la mise en place d'un projet ANR mais aussi de projets intra-maghrébins (voir projet BIREVICMET non retenu).

=> Budget Total du projet : => 5 000 €

2.3.2 Projets non retenus

Tableau 3. Présentation des projets non retenus par année.

2020

Ou ?	APPEL A PROJETS		TITRE PROJET	PORTEUR
OU ?	APPEL PROJETS		TITRE PROJET	PORTEUR
Asie du sud-est	ERC H2020	2019	MOVINSDELTA : Migration and Adaptive Strategies to Climate Change in Asian Deltas	A. DROGOUL (IRD UMR UMMISCO).
Afrique de l'ouest	OHM Tessékéré	2020	TESSENS : Temps Effectif Séjour et Supplémentation Elevage au Nord Sénégal	M. SAQALLI
Afrique de l'ouest	ANR	2020	SWIMS (Small Water Bodies): WP3.	L. KERGOAT (UMR 5562 GET)
Afrique de l'ouest	CNRS initiatives transverses interdisciplinaires. Appel Changement climat	2020	PRATICLIM	C. Pierre (CNRS)
Afrique de l'ouest	ANR-2020 PEA	2020	PARADUS	M. Saqalli (CNRS) & M. Belem (Ouaga2)

2019

Ou ?	APPEL A PROJETS		TITRE PROJET	PORTEUR
Amérique latine	PICS – CNRS 2019-2021	2019	REAJIS : Risques liés à l'Eau et Justice Spatiale : Spatialiser la perception des injustices spatiales liées à l'eau pour	F. BLOT (UT2J GEODE).

					comprendre les dynamiques socio-écologiques en espaces protégés	
Amérique latine	Labex CEBA 2021	2019-2021	2019	MAAD: Monitoring Amazonian Aquatic Diversity	J. MURIENNE, S. BROSSE (EDB)	

2018

Ou ?	APPEL A PROJETS	TITRE PROJET	PORTEUR
Méditerranée	SICMED Agroécosystèmes	2018 FALLERINN: Farm and Agriculture in Lower Litani: Economy of Resources for Individuals, Nahr and Nature (Liban).	M. SAQALLI
Amérique latine	PICS – CNRS	2018 INEG'EAU-Chili : spatialiser la construction des inégalités environnementales liées à l'eau en forte pression climatique et urbaine	F. BLOT (UT2J GEODE).
Amérique latine	CNRS INSHS – Legs Lelong en anthropologie sociale 2018-2020	2018 PASHAMAMA: Prospective Apprehension through Scenarios-based Hypotheses & Multi-Agent Modeling of Ecuadorian Amazon	M. SAQALLI

2017

Ou ?	APPEL A PROJETS	TITRE PROJET	PORTEUR
Amérique latine	AMI OASIC	2017 PASHAMAMA: Prospective Apprehension through Scenarios-based Hypotheses & Multi-Agent Modeling of Ecuadorian Amazon	M. SAQALLI
Amérique latine	PEPS Adaptations Adaptabilités	2017 PASHAMAMA: Prospective Apprehension through Scenarios-based Hypotheses And Multi-Agent Modeling of Ecuadorian Amazon	M. SAQALLI
Pyrénées	ANR Générique	2017 MELLITER : Impact des modes de gestion des territoires sur la ressource mellifère	E. MAIRE (CNRS GEODE).

2016

Ou ?	APPEL A PROJETS	TITRE PROJET	PORTEUR
Amérique latine	PICS	2016 GIVHARO: Geografía Integrativa de las Vulnerabilidades Humanas y Antropológicas y Riesgos en el Oriente	M. SAQALLI
Amérique latine	IFEA	2016 Bourses aides à la mobilité	M. SAQALLI
Amérique latine	Macarthur Tropical Andes (annulé)	2016 Conservation and Sustainable Development Watersheds of the Tropical Andes	M. SAQALLI
Amérique latine	ANR Générique	2016 EVKISS: Evolving kinship relationships and emerging social structures	P. RAMIREZ (Centre d'Etudes Himalayennes)
Afrique de l'Ouest	PICS	2016 SUDAN : Spatialiser Usages et impacts sur Diversité et couverture Arborée des parcs-frontières Niger, Bénin & Burkina Faso	M. SAQALLI
Pyrénées	OHM Vicdessos	2016 VUPAYS : Vulnérabilité Paysagère	E. MAIRE (CNRS GEODE).

2015

Ou ?	APPEL A PROJETS	TITRE PROJET	PORTEUR
Amérique latine	PEPS Indisciplines	2015 DESCOLA: Developing an Ecosystem-Society Combination without Ownership on Land in Ecuadorian Amazon, through ABM	M. SAQALLI
Amérique latine	ANR Générique	2015 ATIMODIS : Ateliers Interdisciplinaires de Modélisation des Interactions Sociales	P. RAMIREZ (Centre d'Etudes Himalayennes)
Amérique latine	ANR Générique	2015 TERRECO: Territorial Resilience of the "Cultural Landscape of the Coffee Region", Colombia	H. MAZUREK (IRD UMR151 - LPED).
Amérique latine	SENESCYT	2015 MONOIL Monitoring environnemental, santé, société et pétrole en Equateur	S. BECERRA & L MAURICE GET)
Afrique de l'Ouest	ANR JCJC	2015 DEMBIOSS: Demography & Ecology-based Mapping of tree Biodiversity of Sudano-Sahelian Togo-Benin to Burkina Faso	M. SAQALLI
Afrique de l'Ouest	IDRC (Canada)	2015 WASLAC: West Africa Societal Learning Alliances on Climate Change	O. NEYA (WASCAL West African Science Service Center on Climate

					Change and Adapted Land Use
Néolithique européen	ANR Roumanie	France-	2015	DANUBE 8000: Lower Danube and its delta in the Anthropocene: trajectories of the evolution of an anthropized system by the cross study of natural & historical archives	L. CAROZZA (CNRS GEODE).
Néolithique européen	ANR JCJC		2015	MORYA: Mountains Ancient mining: environmental imprints & land cover changes during Holocene in Pyrenees & Alps	V. PY-SARAGAGLIA (CNRS GEODE).

2014

Ou ?	APPEL A PROJETS		TITRE PROJET	PORTEUR	
Amérique latine	PRES Région Midi-Pyrénées postdoctorat	2014	MESSAIAH: Modelización Espacial y Social en Amazonia ecuatoriana de las Interacciones entre el Ambiente y Humanos	M. SAQALLI	
Afrique de l'Ouest	ANR JCJC	2014	DENDI : Démographie et Ecologie le long d'un transect Niger-Bénin pour évaluer la Diversité des arbres	M. SAQALLI	
Afrique de l'Ouest	PEPS Interdisciplinaires 2014	2014	DENDI : Démographie et Ecologie le long d'un transect Niger-Bénin pour évaluer la Diversité des arbres	M. SAQALLI	
Méditerranée	Compétences Marocaines à l'Etranger (CME)	2014	BIREVICMET : Apport des biotechnologies microbiennes et Végétales pour la Révégétalisation et Phytostabilisation des sites miniers abandonnés au Maroc	Mustapha MISSBAHI EL IDRISSE (Université de Rabat, Maroc)	
Néolithique européen	ANR Roumanie	France-	2014	CHABADA : «Changements Bassin Danube»	L. CAROZZA (CNRS GEODE).

2.4 Administration et Animation de la recherche

2.4.1 Participation et direction d'axe de recherche

- **Axe 3** : Lors de mon intégration en 2011 au laboratoire GEODE, je me suis impliqué dans l'axe 3 récemment créé appelé «Modélisation des trajectoires spatio-temporelles des paysages » dans le contrat quinquennal 2009/10-2014/15. Ayant participé activement à son animation, j'ai postulé à sa direction lors du départ de son coordinateur, Thomas Houet. Mais le Directeur de l'Unité (DU) a considéré que l'axe n'avait plus de sens et cette action de recherche a été ainsi supprimée des objectifs affichés du laboratoire sans attendre la fin du mandat.
- **Organisation des séminaires** : J'ai également postulé à la direction des séminaires du laboratoire. Occupant cette position pendant 3 mois de décembre 2016 à février 2017 en remplacement de Florence Mazier nommée à cette position, j'ai pu organiser 2 séminaires avant de me voir retirer cette activité. Le laboratoire est sans séminaire de laboratoire depuis cette date.
- **Direction de l'Axe 2 « Dynamiques et enjeux environnementaux et paysagers contemporains »** : Je me suis associé à Frédérique Blot pour le prochain mandat 2021-2025 afin de constituer une candidature de structuration de l'axe qui constitue sur le mandat 15.5 ETP sur 36 permanents, 11 doctorants accueillis et/ou encadrés par ces membres, 34 projets pour un total de ressources propres de 811,7 k€. Cette candidature conjointe a été validée par les membres de l'axe par 100% des votants. Du fait des thèmes et projets de recherches abordés, des moyens humains et techniques disponibles, et mon souci de défendre cette approche à l'interface des sciences biophysiques et sociales, cet axe maintient sa reconnaissance sur la place toulousaine et nationale et internationale pour certaines aires (Amérique latine d'abord, Méditerranée et Afrique). Axe d'origine du laboratoire, il sera très probablement maintenu dans les contrats suivants 2024-2028.

2.4.2 Participation dans des réseaux de recherche

On doit constater qu'il n'existe pas une représentation de l'interdisciplinarité qui dépasse le « comment ». L'interdisciplinarité est perçue d'abord par les acteurs disciplinaires comme étant d'abord un outil de valorisation pour des articles et un passage obligé pour le dépôt de projet : par conséquent, la probabilité de construire un projet sur la base de l'interdisciplinarité seule, ici vue comme la formalisation de dynamiques socio-

environnementales intégrant les SHS, et surtout de les financer via des sources de financement conséquentes, est effectivement nulle : il faut alors s'allier à des thématiciens intéressés. En pratique, il s'agit quasi toujours de chercheurs des sciences biophysiques ouverts aux sciences sociales mais cherchant à en voir le poids car ils sont mieux financés. D'autre part, vue l'inquiétude quant à des méthodes vues comme « pas assez mûres » pour reprendre un avis négatif d'un évaluateur ANR, les projets financés doivent d'abord s'appuyer sur les outils les plus rassurants et les plus reconnus, donc techniques, comme les Systèmes d'Information Géographiques, et fortement s'axer sur la construction de méthodes. Par conséquent, on voit peu l'intérêt de persister à déposer des projets sur les résultats effectifs à prévoir sur tel ou tel terrain, ceux-ci étant systématiquement remis en cause par les évaluateurs spécialistes de telle ou telle thématique réclamant des gages quant aux méthodes. Les projets deviennent surtout à vocation méthodologique mais ne sont pas beaucoup plus financés pour autant.

Ma carrière pré-universitaire, puis mon contrat à la fois professionnel et doctoral ont fait que je n'ai connu le réseau français de recherche qu'après : mes deux contrats postdoctoraux et enfin mon intégration au CNRS ont amélioré cette connexion limitée avec ce réseau. Comme indiqué dans mon projet de recherche, ce diagnostic a signifié une action d'intégration du mieux possible dans ces réseaux mais le handicap s'est avéré non négligeable du fait de la force de l'habitude, où les réseaux de collaborations sont déjà institués.

PALEOMEX MODELISATION

A l'invitation de L. Carozza, j'ai pu être associé à partir de 2017 à un réseau travaillant sur les aspects néolithiques, le programme PALEOMEX dans le chantier MISTRALS (Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales) de l'INSU. Le projet MISTRALS est financé depuis 2010 par le CNRS et a pour objectif de fédérer les recherches scientifiques françaises et de renforcer les collaborations internationales en Méditerranée. Dans ce cadre et avec l'appui de ces coordinateurs successifs (L. Carozza et L. Lespez), j'ai proposé de créer un Groupe « Modélisation » dans le but de structurer la communauté en réseau pour l'ex-région Languedoc-Roussillon. Après acceptation par L. Lespez, j'ai pris la responsabilité de cette action de Recherche d'abord avec J.-M. Carozza, puis O. Peyron et enfin N. Combourieu-Nebout et M.-A. Sicre. Trois stages de Master 2 ont ainsi été portés conjointement avec plus ou moins de réussite. Le programme MISTRALS PALEOMEX n'a pas été renouvelé et je poursuivrais les travaux correspondants jusque la fin de son mandat actuel soit fin 2020 et par la suite, en valorisant les résultats dont on dispose actuellement, par exemple, grâce à un nouveau stage sur la modélisation des forêts prévu en 2021 avec B. Gaudou.

SICMED INDICATEURS

En 2017, un séminaire épistémologique prospectif était organisé à Marrakech par SICMED, accueillant également à titre de bilan et d'ouverture le groupe PALEOMEX avec lequel j'étais ainsi convié. Durant cette réunion, constat a été fait en particulier par Gil Mahé, UMR 050 HSM (HydroSciences Montpellier), Nicolas Arnaud (actuel directeur de l'INSU), Carla Khater (CNRS-Liban), Hedia Chakroun (ENIT), Laurent Dezileau (UMR 6143 M2C) et moi-même de la pertinence d'une réflexion autour d'une possible comparaison entre situations environnementales diverses, certes toutes autour de la Méditerranée. Fort de ce constat, nous avons proposé de créer un nouveau et cinquième programme appelé « Indicateurs & Métriques des Soutenabilités Environnementales » (IMESSOUENE) dont j'ai pris la direction avec Hedia Chakroun, ENIT (École Nationale d'Ingénieurs de Tunis). Deux actions phares sont représentatives de cet effort :

1. L'organisation d'un séminaire fondateur de ce groupe, du 26 au 29 novembre 2018 à Hammamet (Tunisie) sur le thème « Métriques des soutenabilités & Indicateurs ». Environ 50 personnes ont participé à ce séminaire (41% de tunisiens, 22% de français, 15% de marocains, 11% de libanais, le reste étant algérien, arménien, espagnol et italien).
2. L'organisation d'un appel d'offre également appelé Indicateurs organisé pour 2019 et 2020 avec une dotation annuelle de 2.5k€ par projet. 8 projets sur 14 ont ainsi été retenus et financés.

Participations à d'autres groupes scientifiques

En lien avec le programme SICMED, j'ai eu le plaisir d'être associé au **GDRi O-LIFE** (Observatoire Libano-Français de l'Environnement¹). Ce groupe de recherche environnemental franco-libanais associe CNRS (et son représentant Jean-Luc Probst), IRD (et son représentant, Laurent Drapeau) et le CNRS-Liban (et sa représentante, Carla Khater) soutenu par l'INSU et son directeur, Nicolas Arnaud. Les thématiques, très proches de SICMED et partageant cet intérêt pour la construction d'indicateurs à l'interface entre société et environnement (programme KEV : Key Environmental Variables), un regard commun a favorisé mon intégration. Malheureusement, la succession de drames que connaît le Liban (crise des réfugiés syriens avec 20 à 25% de population en plus, profonde crise économique, pandémie de COVID-19, explosion de Beyrouth) a empêché une plus grande implication de ma part en pratique dans ce réseau (organisation du séminaire GDRi à Beyrouth, dépôt du programme Fallerine, appui encadrement de la thèse de R. Baissari). <http://www.o-life.org/>

Depuis longtemps associé à la communauté de modélisation sociale et spatialisée en France, j'ai été choisi comme représentant du laboratoire GEODE au sein du **GDR MAGIS** "Méthodes et Applications en Géomatique et Information Spatiale" lors du renouvellement de son équipe de direction et de sa nouvelle directrice, Françoise Gourmelon. <http://gdr-magis.imag.fr/>

Les Groupes d'Intérêt Scientifique (GIS) sont des réseaux de mise en contact de chercheurs travaillant sur des thématiques et/ou des terrains communs et le plus souvent résidant à proximité. Je me suis impliqué dans deux réseaux, les **GIS Afrique** et GIS Eau. Le premier, porté par Stéphanie Lima, a d'abord cherché à se structurer en recensant les forces vives sur Toulouse et n'est pas encore reconnu par le CNRS. Le deuxième est validé et regroupe une plus grande communauté de chercheurs appartenant à tous les organismes scientifiques français. J'ai cependant préféré, pour éviter une trop grande dispersion de mes activités et points d'intérêt, proposer le transfert de la représentation du laboratoire UMR GEODE dans ce réseau, que j'assurais, à Frédérique Blot et Anne Peltier qui en assureront le suivi.

Les LabEx (Laboratoires d'Excellence) sont des structures semi-pérennes à moyen terme d'appui à la recherche, comparativement confortablement dotées, et gérées par des consortiums regroupant centres de recherche et universités. Je me suis associé à trois d'entre eux :

Le LabEx DRIIHM (Dispositif de Recherche Interdisciplinaire sur les Interactions Hommes-Milieus www.driihm.fr), porté par Robert Chenorkian, est un LabEx d'appui à des Observatoires Hommes-Milieus (OHM). Si le laboratoire UMR GEODE est en charge d'un de ces OHMs, l'OHM Vicdessos, mon implication y a été rendue malaisée par d'une part le fait que le territoire est spatialement restreint et désertifié, rendant difficile la mise en place d'enquêtes statistiquement valables (11 élèves sur le site, dont 6 retraités en voie d'abandon). J'envisage à moyen terme d'y commencer une prospection ZADA mais sur un territoire plus vaste à l'échelle de la portion centrale des Pyrénées (Ariège, Haute-Garonne) puis d'étendre cette recherche sur les bords est et ouest (Pyrénées-Orientales, Hautes-Pyrénées et éventuellement Pyrénées-Atlantiques). Ma pratique des pays du Sud (et en particulier Amazonies et Sahels) m'a orienté préférentiellement sur des terrains comparables, les OHMs Oyapock et Tessékéré. Leur soutien en 2017 et 2018 ont été une magnifique occasion de faire du terrain, d'élargir mes perspectives et de produire une large quantité de données ZADA. Malheureusement, ces deux OHMs ont vu comme les autres observatoires leurs dotations diviser par 4 et donc les probabilités d'être financé se sont réduites drastiquement. Ainsi, il me faut déjà valoriser les données dont je dispose, dont il est question dans la section §5, pour envisager des futures actions de recherche sur ces sites.

Le LabEx SMS (Structuration des Mondes Sociaux www.sms.univ-tlse2.fr), porté par Michel Grossetti, regroupe les laboratoires liés aux Sciences Humaines et Sociales sur la place de Toulouse. Le directeur de mon laboratoire,

¹[https://www.ird.fr/la-recherche/groupement-de-recherche-international-sud-gdri-sud/\(departement\)/27e6ba84619fe936c2993e6ed1d8e63f/\(nom_departement\)/D%C3%A9partement%20Dynamiques%20Internes%20et%20de%20Surface%20des%20Continents%20\(DISCO\)](https://www.ird.fr/la-recherche/groupement-de-recherche-international-sud-gdri-sud/(departement)/27e6ba84619fe936c2993e6ed1d8e63f/(nom_departement)/D%C3%A9partement%20Dynamiques%20Internes%20et%20de%20Surface%20des%20Continents%20(DISCO))

Didier Galop, m'y a nommé représentant. Je suis dorénavant membre du comité éditorial du journal Mondes Sociaux depuis octobre 2020.

Le LabEx CEBA (Centre d'Etudes sur la Biodiversité Amazonienne www.labex-ceba.fr), porté par Jérôme Chave, initialement à vocation biologique et centré sur la Guyane française s'est ouvert sur d'autres terrains en Amazonie et en particulier sur l'Amazonie Equatorienne dont l'Université Estatal Amazónica de Puyo avec laquelle j'ai déjà réalisé de mon côté des missions de terrain et où j'ai donné des séminaires. Un appel d'offres pan-Amazonien avait d'ailleurs été envisagé. De plus, une ouverture, certes limitée sur les sciences sociales, était également proposé et une équipe du laboratoire EDB (Evolution et Diversité Biologique), Jérôme Murienne et Sébastien Brosse, souhaitaient m'associer à leurs travaux. Malheureusement, la conjonction de réductions budgétaires, ayant fortement réduit les dotations et annulant l'appel d'offres pan-amazonien, et de l'épidémie de la COVID-19, a repoussé *sine die* ces actions de recherche.

2.4.3 Organisation de manifestations scientifiques

- 2020 12^{ème} séminaires annuels du réseau FONCIMED « formes foncières héritées et enjeux contemporains de la montagne méditerranéenne » CORTE (Corse) 12-14 octobre 2020 Président de séance Session thématique – Axe 5 Politiques agricoles en montagne : enjeux fonciers, enjeux collectifs
- 2019. Repoussé à 2020 puis *sine die* : Atelier international O-Life " Le Nahr Ibrahim, préserver un bassin de vie face aux pressions multiples du changement » Université Saint-Esprit De Kaslik, Jounieh, Liban- 28-29 octobre 2019, GDRI O-LIFE. Organisation : C. Khater, O. Drapeau, 40 participants
- 2018. Colloque international "Atelier SICMED Métrique des Soutenabilités et Indicateurs » Hammamet, Tunisie- 26-29 Novembre 2018, Programme MISTRALS SICMED. Organisation : Chakroun, Saqalli 40 participants
- 2018. Colloque CESS "Contaminations, environnement, santé et société : de l'évaluation des risques à l'action publique" (conférence labellisée ESOF), Toulouse, France, 04-06 juillet 2018. Co-organisateur, Membre du comité scientifique, 120 participants ;
- 2015. Workshop OHM MECHOUI « Systèmes d'élevage pyrénéens » Labex DRIIIHM OHM MECHOUI Toulouse, France. 18 novembre 2015. Organisation : M. Saqalli, 15 participants ;
- 2013. Colloque Interactions " Dynamiques environnementales, politiques publiques et pratiques locales : quelles interactions? Toulouse, France, 4-7 juin 2013. Co-organisateur, Membre du comité scientifique, 180 participants ;

Séminaires du GEODE

- 2017. Ostrom, Anders & Janssens Robustness of Social-Ecological Systems to Spatial and Temporal Variability M. Saqalli, 11/05/2017; Organization : M. Saqalli, 20 participants
- 2017. De l'eau dans la Garonne à la Dengue en Asie du Sud Est : Vers des modèles multiagent des systèmes complexes : Benoît Gaudou, 31/01/2017 ; Organisation : M. Saqalli 15 participants

2.4.4 Evaluation de la recherche

Expertises scientifiques

Tableau 4. Organisme et type d'appel des expertises scientifiques réalisées.

Structure, Organisme	Type d'appel	Année
UCL Université catholique de Louvain	Fonds spéciaux de recherche postdoctoral Fellowships, Marie Curie Actions of the European Commission	2011
AIRD _ Agence Inter-établissements de Recherche pour le Développement	Appel à propositions « Jeunes Équipes AIRD » (JEAI)	2012
AIRD _ Agence Inter-établissements de Recherche pour le Développement	Programme Allocations de recherche pour une thèse au Sud	2013
IFS - International Foundation for Science	IFS Programme of support for young researchers	2014
IMéRA Institut d'études avancées d'Aix-Marseille	7ème appel à candidatures Mediterranean Seeds	2015
Institut des Amériques	Appel Aide à la recherche doctorale (ARD)	2016
IMéRA Institut d'études avancées d'Aix-Marseille	8ème appel à candidatures Mediterranean Seeds	2016

Agence universitaire de la Francophonie
 Région Nouvelle-Aquitaine
 Région Auvergne-Rhône-Alpes

<i>Appel expertise changements climatiques aux Suds</i>	2017
<i>Appel à Projets ESR 2018 – Volet Recherche</i>	2018
<i>Appel à projets « Pack Ambition Recherche »</i>	2018

Evaluation d'articles scientifiques

Tableau 5. Revues, conférences et années des évaluations d'article scientifiques.

<i>Journal, revue</i>	Années	Articles
<i>Ecological Modelling</i>	2009	1
<i>Journal of Artificial Societies & Social Simulations</i>	2011-2018	8
<i>African Journal of Agricultural Research</i>	2011	1
<i>International Journal of Peace and Development Studies</i>	2011-2012	2
<i>Bioinfo Publications</i>	2012	1
<i>International Journal of Geographical Information Science</i>	2012	1
<i>Human Ecology</i>	2012-2020	12
<i>African Journal of Environmental Science and Technology</i>	2014	1
<i>Applied Geography</i>	2014-2017	3
<i>Cahiers de l'Agriculture</i>	2014	1
<i>Les Cahiers du LERASS, Sciences de la Société</i>	2015	1
<i>Agricultural Systems</i>	2017	1
<i>International Journal of Computational Economics and Econometrics</i>	2017	1
<i>Journal of Environmental Management</i>	2017	2
<i>Environment, Development and Sustainability</i>	2017	1
<i>Sustainability</i>	2020	2
Conférences	Années	Articles
<i>MASH 2009 : Modèles et Apprentissage en Sciences Humaines et Sociales</i>	2009	1
<i>1er Congrès International de l'Arganier, Agadir, Maroc</i>	2011	1
<i>Dynamiques environnementales, politiques publiques et pratiques locales : quelles interactions ?</i>	2013	19
<i>MASyCo'2013 : Modélisation Agents pour les Systèmes Complexes</i>	2013	1
<i>Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática 2017 & 2018</i>	2017-2018	5
<i>IPGH Premio Cartografía Prize for the outstanding MSc/MA thesis in cartography, geodesy and/or geographic information</i>	2018-2020	3
TOTAL		68

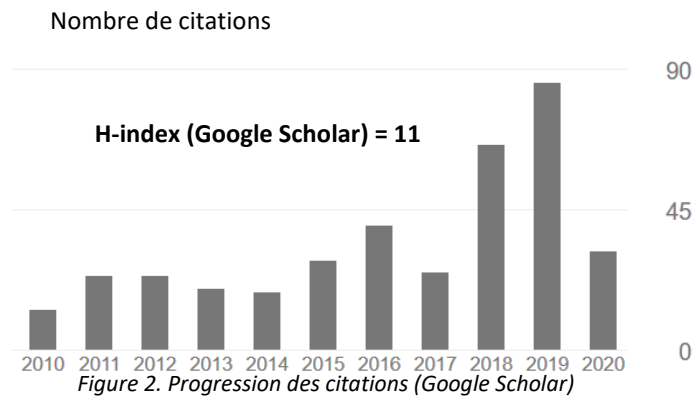
2.5 Publications (Revue, Chapitres, Conférences)

Depuis mon début de carrière en 2003 jusque 2020, ma production scientifique se compose de **3 ouvrages**, dont un est issu d'un collectif, **30 articles** dans des revues scientifiques à comité de lecture, **16 chapitres** d'ouvrage et **23 communications avec révision par les pairs** en colloques/séminaires. Enfin, notons que 3 articles sont soumis et 7 autres sont à des degrés différents de production, de l'écriture à la formalisation. Depuis mon entrée au CNRS en 2012, la publication d'articles dans des revues à comité de lecture suit une moyenne de **2,4 articles par an**. A noter que ma position en tant qu'auteur évolue de plus en plus souvent en dernière position, celle par convention des coordinateurs de projets et d'articles, laissant volontairement les étudiants et chercheurs contractuels, au statut plus précaire en premier auteur. Le détail est présenté dans le tableau 6 ci-dessous :

Tableau 6. Types et années des publications scientifiques produites.

<i>Ecrits</i>	03-10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Total
<i>Ouvrages et Direction d'Ouvrages [DO]</i>	1					1				1		3
<i>Articles Revues à Comité de Lecture [ACL]</i>	6	3		1	1	2	4	5	2	3	3	30
<i>Chapitres d'Ouvrage [OS-C]</i>						5		3	3	5	1	17
<i>Articles Conférence à Comité de Lecture [C-ACTI] & [C-ACTN]</i>	7			2	2		3	1	4	1	4	23
<i>Articles Conférence sans Comité de Lecture [C-COM] & Posters [C-AFF]</i>	31		7	3	2	5	1	4	6		4	63

Ma production scientifique maintient un rythme cyclique en termes de publications, les cycles s'élargissant quantitativement avec une ouverture progressivement à l'extérieur de Toulouse déjà organisée, laissant peu de place pour le montage de projets viables au-delà du projet ANR MONOIL et ses dérivés GHIVARO & PASHAMAMA. Cet élargissement des collaborations et des partenariats, visibles par l'importance des conférences et séminaires, s'est accompagné d'une volonté de publication d'articles de synthèse et le lancement d'ouvrages.



Soumis / En chantier

1. Kabuanga J. M., Kankonda O. M., Horning N., **Saqalli M.**, Maestriperieri N., Imwangana M. F., Mané L. Random forest algorithm for mapping deforestation in the Ituri-Epulu-Aru landscape (Democratic Republic of Congo). *Remote Sensing (soumis)* <https://www.preprints.org/manuscript/202012.0752/v1>
2. [ACL]. Belem M., Olaniyi A. O., Barbier B., **Saqalli M.**, H. K. Mandé, Sawadogo P. Projection of West-African Cropland Dynamics under socio-economic and Climate Scenarios. *Futures (soumis)*
3. [ACL]. Durango-Cordero, J., **Saqalli, M.**, Ferrant, S., Bonilla, S., Maurice, L., Arellano P., Elger, A. 2020. Risk assessment of unlined oilpits to groundwater in the Ecuadorian Amazon: A modified GIS-DRASTIC approach. *Applied Geography (soumis)*
4. [ACL]. **Saqalli M.**, Diallo Hamath A., Kaced D., Belem M., Iopue R., Moussa Y., Ducourneau A., Gaudou B. Cartographie sémantique par zonage à dire d'acteurs : Le Ferlo (Sénégal) et ses alentours (Sénégal). *Vertigo (soumis)*
5. [ACL] **Saqalli M.**, Sougnabé P., Ferrant, S., Gangneron F. Exclusions foncières familiales des cadets à l'Ouest du Lac Tchad : un vivier pour Boko Haram ? *Espaces, Populations, Sociétés (soumis)*
6. [ACL]. Kaced D., Gaudou B., **Saqalli M.**, Méjean R. Perception-based Regional Mapping normalization and Ontology merging. *International Journal of Information Management. (en chantier)*
7. [ACL]. Kaced D., Gaudou B., **Saqalli M.**, Méjean R. Assisted knowledge formalization for exploring locally-originated spatial description of a territory. *Applied Geography. (en chantier)*
8. [ACL]. Maestriperieri N., Balbontín D. T., Heilmayr R., Monteil C., Etienne M., Paegelow M., Selleron G., Métaillé J.-P., Sáez Villalobos N., **Saqalli M.** Finding simplicity in complexity. A conceptual model of the forest system in southern Chile. *Geoforum. (en chantier)*
9. [ACL]. López F., Maurice L., Budzinski H., Le Menach K., Jamhoury H., Lerigoleur E., **Saqalli M.**, Devier M.-H., Ochoa V., Schreck E. 2020. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water and sediments at oil exploration and refining sites in Ecuador: concentrations and source distribution. *Journal of Environmental Science (en chantier)*
10. [ACL]. Durango-Cordero J., **Saqalli M.**, Locquet M., Elger A. Spatial Distribution of Estimated Hazardous Emissions from Multiple-Sources: A case study of Oil Industry in Northeastern Ecuadorian Amazon. *Annals of the American Association of Geographers. (en chantier)*
11. [DO]. **Saqalli M.**, de Meyer C., Méjean R. (Eds.) Atlas des perceptions locales du territoire en Amazonie Equatorienne. Quae (*en chantier*)

2020

12. [ACL] **Saqalli M.**, Rojas Cifuentes C., Maire E., Janaína dos Santos Alves M., Kaced D., Gaudou B., Fiamor A-E. 2020. Flux, usages et appartenances sur le bassin de l'Oyapock (Guyane française et Amapa) vues par enquêtes sociogéographiques. *Confins (accepté)*
13. [ACL] Masimo Kabuanga J. Adipalina Guguy B., Ngenda Okito E., Maestriperieri N., **Saqalli M.**, Rosi V., Iyongo Waya Mongo L. Suivi de l'anthropisation du paysage dans la région forestière de Babagulu, République Démocratique du Congo. *Vertigo* 20, 2. <https://journals.openedition.org/vertigo/28347>.
14. [ACL]. **Saqalli M.**, Hamrita A., Maestriperieri N., Boussetta A., Rejeb H., Mata Olmo R., Kassouk Z., Belem M., Saenz M., Mouri H. 2020. "Not seen, not considered": An evaluation of differential perceptions of environmental risks using Perception-Based Regional Mapping: the case of heavy metal dispersion extent

- in the Plain of Mornag facing old plumb mine spoil tips of Jebel Ressass (Tunisia). *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 5, 30. <https://doi.org/10.1007>
15. [ACL]. **Saqalli, M.**, Béguet E., Maestripiéri N., de Garine E. 2020. Somos Amazonia", a new inter-indigenous identity in Ecuadorian Amazonia : beyond a tacit Jus apudia of ecological origin ? *Perspectiva Geográfica*, 25, 1.
 16. [OS-C] Hamrita A., Boussetta A., Kortas C., **Saqalli M.**, Fiamor A.-E., Mata Olmo R., Rejeb H. 2020. La patrimonialisation des paysages viticoles de la plaine de Mornag : un nouvel axe de développement local d'un territoire face aux conflits d'usage. In : Bouslikhane A., Faouzi H., Boujrouf S. (Eds.). Du terroir au territoire : les enjeux de la patrimonialisation des produits de terroir, L'Harmattan, Paris, France (*accepté*)
 17. [PV] **Saqalli, M.** 2020. Une mosaïque de nuisances et de contaminations en Tunisie. Atlas des Nouveaux mondes, Paris, France. INSU MISTRALS SICMED www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/mediterranee-une-mosaïque-de-nuisances-et-de-contaminations.
 18. [C-ACTN] **Saqalli M.**, Hamrita A., Mouri H., El Hachimi M. L., Benyassine E. M. 2020. Proposition de recherche comparative de la recomposition des usages de la montagne méditerranéenne autour de mines abandonnées au 20^{ème} siècle : Moyen Atlas, Pyrénées, Piémont tunisien. FONCIMED. Réseau de recherche et d'échange sur le foncier méditerranéen. 12^e Séminaire Annuel "Biodiversité, Environnement & Paysage : Propriétaires locaux vs. Enjeux (Climat, Urbanisation, Etc.), Corte, France
 19. [C-ACTI]. Belem M., Zidama S., Zougrana O., **Saqalli M.** 2020. Development of an Integrated Framework for Knowledge Sharing and Integration on Land use and Land Management in West Africa. IST-Africa 2020 Conference Proceedings. Cunningham M. & Cunningham P. (Eds). IST-Africa Institute and IIMC, ISBN: 978-1-905824-64-9
 20. [C-ACTI]. Méjean R. Chapuis K., Kaced D., **Saqalli M.** Paegelow M. Towards "Socializing the pixel" and "Pixelizing the social" with GAMA platform : an Agent-Based Model of Land Use and Land Cover Changes in Northern Ecuadorian Amazon. 10th IEMS Conference, Brussels then virtualized 09/2020.
 21. [C-COM]. Lespez L., Kuzuoglu C., Dezileau L., **Saqalli M.** 2020. Changements climatiques et rapide et complexité des dynamiques socio-environnementales dans le monde Méditerranéen ancien. Conference MISTRALS MED2020. Virtualized, 11/2020.
 22. [C-COM]. **Saqalli M.**, Azuara J., Combourieu-Nebout N., Sicre M.-A., Lespez L. Spatial and temporal reconstruction of present and past vegetation cover in Languedoc-Roussillon. Conference MISTRALS MED2020. Virtualized, 11/2020.
 23. [C-COM]. Chakroun H., **Saqalli M.**, Mahé G., Slama F., Hallouz F., Mouillot F., Gargouri E., Huneau F. Indicateurs de soutenabilité pour une meilleure gouvernance de l'eau en Méditerranée. Conference MISTRALS MED2020. Virtualized, 11/2020.
 24. [C-COM]. Méjean R. Chapuis K., **Saqalli M.** Paegelow M. Building an Agent Based model to simulate changes between two land Cover maps: an Init optimization. GAMA days, Toulouse, 06-12/06/2020
 25. [C-COM]. **Saqalli M.**, Cahierre M., Peyron O., Azuara J., Combourieu-Nebout N., Sicre M.-A., Lespez L. 2020. Classification of ligneous vegetation into Plant Functional Types for a dynamic reconstitution of Neolithic vegetation cover in Occitania Mediterranean seashores. EGU 2020. EGU2020-5212
 26. [C-COM]. Cahierre M., **Saqalli M.**, Azuara J., Peyron O. 2020. Earth, trees and fire: connecting vegetation and socio-anthropology in French Mediterranean Neolithic modelling. World Archaeological Conference, Prague, Rép. Tchèque, ensuite virtualisée.
 27. [C-COM]. **Saqalli M.** 2020. "Never go against the family": An enlarged communitary family structure for the Linear Band Ceramic culture hypothesis for explaining longhouses, colonization capacity and collapse. World Archaeological Conference, Prague, Rép. Tchèque, ensuite virtualisée.
- ## 2019
28. [ACL]. Durango-Cordero, J., **Saqalli, M.**, Parra, R., Elger, A. 2019. Spatial inventory of selected atmospheric emissions from oil industry in Ecuadorian Amazon: Insights from comparisons among satellite and institutional datasets. *Safety Science* 120, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.047>
 29. [ACL]. Boussetta A., **Saqalli M.**, Rejeb H. 2019. Des formes paysagères caractéristiques d'un territoire rural en mutation : cas de la plaine de Mornag. *Revue des Régions Arides, Institut des Régions Arides de Médenine*, 35.
 30. [ACL]. Houssou N. L. J., Durango-Cordero J., Bouadjio-Boulic A., Morin L., Maestripiéri N., Ferrant S., Belem M., Peláez J. I., Saenz M., Lerigoleur E., Elger A., Gaudou B., Maurice L., **Saqalli M.** 2019. Synchronizing histories of exposure and demography: the construction of an agent-based model of the Ecuadorian Amazon colonization and exposure to oil pollution hazards. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22, 2, 1 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/22/2/1.html>, DOI: 10.18564/jasss.3957

31. [DO]. **Saqalli M.**, Vander Linden M. 2019. Integrating qualitative and social science factors in archaeological modelling. Springer Simulating the Past books Series. Springer Editions, New York, USA.
32. [OS-C]. Vander Linden M., **Saqalli M.** 2019. Introducing qualitative and social science factors in archaeological modelling: necessity and relevance. In: Integrating qualitative and social science factors in archaeological modelling. Springer Simulating the Past books Series. Springer Editions, New York, USA.
33. [OS-C]. **Saqalli M.**, Saenz M., Belem M., Lespez L., Thiriot S. 2019. *O tempora O mores*: Building an epistemological procedure for modeling the socio-anthropological factors of rural Neolithic socio-ecological systems: Stakes, choices, hypotheses and constraints. In: Integrating qualitative and social science factors in archaeological modelling. Springer Simulating the Past books Series. Springer Editions, New York, USA.
34. [OS-C]. **Saqalli M.**, Vander Linden M. 2019. Trowels, processors and misunderstandings: concluding thoughts. In: Integrating qualitative and social science factors in archaeological modelling. Springer Simulating the Past books Series. Springer Editions, New York, USA.
35. [OS-C]. Méjean R., Paegelow M., **Saqalli M.**, Kaced D. 2019. Business-as-Usual Scenarios in Land Change Modelling by Extending the Calibration Period and Integrating Demographic Data. *Geospatial Technologies for Local and Regional Development*, 243-260. Springer, Cham.
36. [OS-C]. Kaced D., Méjean R., Richa A., Gaudou B., **Saqalli M.** 2019. PASHAMAMA: An Agricultural Process-Driven Agent-Based Model of the Ecuadorian Amazon. In: Davidsson P., Verhagen H. (Eds.). *Multi-Agent-Based Simulation XIX, 19th MABS 2018*, Stockholm, Sweden, 123 LNAI 11463, 59-74
37. [C-ACTI]. Méjean R., Paegelow M., **Saqalli M.**, Kaced D. 2019. Improving Business-as-Usual Scenarios in Land Change Modelling by Extending the Calibration Period and Integrating Demographic Data, 22nd Conference on geo-information sciences, Limassol, Cyprus, 2019/06/17-20. <https://agile-online.org/>

2018

38. [ACL]. Durango Cordero J. S., **Saqalli M.**, Laplanche C., Locquet M., Elger A. 2018. Spatial analysis of accidental oil spills using heterogeneous data: a case study from the northeastern Ecuadorian Amazon. *Sustainability*, 10, 12, 4719.
39. [ACL]. Pelaez J. I., Vaccaro G., Yanez E., **Saqalli M.** 2018. Un Sistemas para Detección de Contaminación por Hidrocarburos: Aplicación al Oriente Ecuatoriano. *Revista Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática*: RISCO, número special CISC Orlando 2017.
40. [OS-C]. Gaudou B., Belem M. Saenz M., Paegelow M., Maestriperi N., **Saqalli M.**, Houssou L. 2018. Le modèle PASHAMAMA-MONOIL : impacts des activités pétrolières en Équateur. In : *Systèmes Complexes : de la Biologie au territoire. Les dossiers d'Agropolis International*.
41. [OS-C]. Paegelow M., Maestriperi N., **Saqalli M.** 2018. La prospective territoriale : de la modélisation spatio-temporelle aux scénarii futurs. In : *Systèmes Complexes : de la Biologie au territoire. Les dossiers d'Agropolis International*.
42. [OS-C]. **Saqalli M.**, Belem M., Gaudou B., Saenz M. Paegelow M., Maestriperi N. 2018. Modéliser les sociétés et leurs territoires : de l'importance des sciences sociales. In : *Systèmes Complexes : de la Biologie au territoire. Les dossiers d'Agropolis International*.
43. [C-ACTI]. Durango Cordero J., **Saqalli M.**, Elger A. 2018. Spatialisation du risque environnemental lié aux activités pétrolières en Amazonie équatorienne. Colloque « contaminants environnementaux et santé » ESOF 2018, Université Toulouse 2 Jean Jaurès, Toulouse, France. <https://cess.sciencesconf.org/>
44. [C-ACTI] Méjean R., de Meyer, C., Kaced D., **Saqalli M.** 2018. Contaminations et conflits environnementaux contrastés en Amazonie équatorienne : une approche par la cartographie participative. Colloque « contaminants environnementaux et santé » ESOF 2018, Université Toulouse 2 Jean Jaurès, Toulouse, France. <https://cess.sciencesconf.org/> (hal-01781879)
45. [C-ACTI] Kaced D., Méjean R., Richa A., Gaudou B., **Saqalli M.** 2018. PASHAMAMA: An agricultural process-driven agent-based model of the Ecuadorian Amazon. MABS 2018: 19th International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation. Stockholm, Sweden. <http://iotap.mau.se/mabs2018/>
46. [C-ACTI] Belem M., Olaniyi A. O., **Saqalli M.**, Barbier B., Mande H. K., Tondoh J. E. 2018. Prediction of West African Cropland Dynamics under Climate Scenarios. IEEE – 1st International Conference on Smart Cities and Communities, 24-26 July 2018, Ouagadougou, Burkina Faso. <https://www.ieee-france.org/index.php/262-ieee-1st-international-conference-on-smart-cities-and-communities-24-26-july-2018-ouagadougou-burkina-faso>
47. [C-COM] Rojas Cifuentes C., Maire E., Fozzani J., Davy D., dos Santos Alves M. J., **Saqalli M.** 2018. Pluris Homo Potamos : Enjeux socio-économiques et environnementaux autour du fleuve Oyapock : Premiers apports de la méthode de cartographie ZADA (Zonage A Dires d'Acteurs). Colloque Circulations, frontières et villes dans les Guyanes. 08-09/11/2018. Université de Guyane, Cayenne, France.

<http://www.driihm.fr/actus/actus-generales/367-appel-a-communication-circulations-frontieres-et-villes-dans-les-guyanes>

48. [C-COM] **Saqalli M.**, Méjean R., de Meyer C. 2018. Algunos resultados de las cartografías con actores (CADA) realizadas en el territorio del Oriente. Restitución Programa MONOIL, 28/04/2018. Universidad Estatal Amazónica de Puyo, Equateur.
49. [C-COM] **Saqalli M.**, Fozzani J., Maire E., Lerigoleur É., Davy D., Dos Santos Alves M. J., Rojas Cifuentes C. 2018. FEZOAD1 et 2 : Premiers apports de la méthode de cartographie à dire d'acteurs ZADA autour du fleuve Oyapock. Séminaire restitution OHM Oyapock 06/12/2018, Cayenne, France. <http://www.driihm.fr/actus/actus-du-reseau/379-9eme-seminaire-de-restitution-de-l-ohm-oyapock>
50. [C-COM] **Saqalli M.**, Chakroun H. 2018. Conférence SICMED : Métrique des Soutenabilités : Introduction, justification et Bilan. Atelier SICMED : Métrique de soutenabilité et indicateurs. Hammamet, Tunisie, 26-29/11/2018. <https://aed.org.tn/atelier-sicmed-metrique-des-soutenabilites-et-indicateurs-26-29-nov-2018/>
51. [C-COM] **Saqalli M.**, Gangneron F., Maire E. 2018. Dynamiques socio-environnementales pour une prospective de la couverture arborée sahélo-soudanienne : une proposition méthodologique pour un transect Niger-Bénin. Programme AMMA-CATCH 2018, UAM Université Abdou Moumouni Dioffo, Niamey, Niger 12-14/11/2018. <https://ammacatch-30ans.sciencesconf.org/>
52. [C-COM] Diallo A. H., **Saqalli M.** 2018. FERLOZAD : Le Zonage à Dires d'Acteurs, un outil de diagnostic et d'analyse des interactions entre Hommes et Territoire. Séminaire restitution OHM Tessékéré, 05-06/11/2018. Dakar, Sénégal. <http://www.driihm.fr/agenda-driihm/123-seminaire-annuel-de-restitution-de-l-ohmi-tessekere-2>

2017

53. [ACL] Ferrant S., Selles A., Le Page M., Herrault P.-A., Pelletier C., Al-Bitar A., Mermoz S., Gascoin S., Bouvet A., **Saqalli M.**, Dewandel B., Caballero Y., Ahmed S., Maréchal J.-C., Kerr Y. 2017. Detection of irrigated crops from Sentinel-1 and 2 Sentinel-2 data to estimate seasonal groundwater use three in South-India. *Remote Sensing*, 9 (11):1119.
54. [ACL] Belem M., **Saqalli M.** 2017. Development of an integrated generic model for multi-scale assessment of the impacts of agro-ecosystems on major ecosystem services in West Africa. *Journal of Environmental Management*. 202, 1, 117–125.
55. [ACL] **Saqalli M.**, Saenz M. 2017. Review of "Analytical Methods for Dynamic Modelers" by H. Rahmandad R.O., Osgood N.D., Richardson G. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 20, 3.
56. [ACL] Morin L., **Saqalli M.** 2017. Una historia agraria al amparo del petróleo: el caso de la parroquia de Dayuma. *Huellas del Sumaco, Revista de la Universidad Estatal de Puyo*, 16 | 2017.
57. [ACL] Hamrita A., Boussetta A., Olmo R. M., **Saqalli M.**, Rejeb H. 2017. Integrated water management and durability of landscape of public irrigated areas in Tunisia: cases of public irrigated areas of Chott-Meriem and Mornag. *International Journal of Research - Granthaalayah*, 5(1), 73-89. <https://doi.org/10.5281/zenodo.260280>.
58. [OS-C] **Saqalli M.**, Maestripiéri N., Jourden M., Saenz M., Maire E. 2017. Spatialiser un risque environnemental via les perceptions locales : Une démarche, trois terrains (Equateur, Tunisie, Laos). In : M. Gaille. *Pathologies environnementale : Identifier, comprendre, agir*. Chap. 2 77-112. CNRS Editions. Paris, France.
59. [OS-C] Lerigoleur E., Bosque S., Maestripiéri N., Gil E., **Saqalli M.** 2017. Des cartes librement accessibles pour visualiser le paysage pétrolier en Amazonie. In : Becerra S., Maurice L. « Bien vivre » avec les activités pétrolières en Equateur/"Buen vivir" con las actividades petroleras en el Ecuador 12-15.
60. [OS-C] **Saqalli M.** Maestripiéri N., Lerigoleur E., Gil E., Bosque S., Morin L. 2017. Cartographie des perceptions du territoire amazonien : importance perçue des activités pétrolières. In : Becerra S., Maurice L. « Bien vivre » avec les activités pétrolières en Equateur/"Buen vivir" con las actividades petroleras en el Ecuador 12-15.
61. [C-ACTI] Belem M., **Saqalli M.** 2017. Development of an integrated generic model for multi-scale assessment of the impacts of agro-ecosystems on major ecosystem services in West Africa. WCNRM2017 Conference "Vulnerability and Resilience of Socio-ecological Systems" Barcelona, España. https://issuu.com/paucostafoundation/docs/booklet-2-fundacio_web
62. [C-COM] **Saqalli M.** 2017. Une brève histoire de l'Agriculture sud-africaine au travers du cas de l'ancien « homeland » du Ciskei. Festival International de Géographie. St-Dié des Vosges, France.
63. [C-COM] **Saqalli M.** 2017/11. Modélisation d'enjeux ruraux : Approches par la Modélisation multi-agents. Séminaire EDYTEM. Le-Bourget-du-Lac, France

64. [C-AFF] **Saqalli M.**, Ali Moussa T., Peyron O., Sabatier P., Combourieu-Nebout N., Dezileau L., Bassetti M.-A., Vannière B., Sicre M.-A., Carozza L., Carozza J.-M., Lespez L. 2017. Land, rain and sweat: Building a database of what we need for building a temporally dynamic and a spatially explicit agent-based model of Neolithic occupation in Languedoc-Roussillon. Conférence MISTRALS PAELOMEX 16-18/10/2017, Montpellier, France.
65. [C-AFF] Lespez L., Bassetti M.-A., Berger J.-F., Carozza J.-M., Carozza L., Combourieu-Nebout N., Dezileau L., Glais A., Ghilardi M., Kuzucuoglu C., Peyron O., Sabatier P., **Saqalli M.**, Vannière B., Sicre M.-A., Jalali B. & Paleomex team. 2017. Climate Change and social transformations in the past (12ka BP): from field data acquisition towards socio-ecological modeling. Conférence MISTRALS PAELOMEX 16-18/10/2017, Montpellier, France

2016

66. [ACL] Maestriperieri N., **Saqalli M.** 2016. Assessing Health Risk Using Regional Mappings Based on Local Perceptions: A Comparative Study of Three Different Hazards. *Human and Ecological Risk Assessment Journal*, 22, 3, 721-735.
67. [ACL] Becerra S., **Saqalli M.**, Gangneron F., Dia H. A. 2016. Everyday vulnerabilities and responses in the Malian Sahel, an indication for evaluating future adaptability to water crises. *Regional Environmental Change*, 16, 5, 1253-1265.
68. [ACL] **Saqalli M.**, Fiamor A.-E. 2016. La Montagne intérieure, épreuve initiatique individuelle de lucidité dans le Seigneur des Anneaux. *Journal of Alpine Research*, 2886 <http://rga.revues.org/2886>.
69. [ACL] Ducourneau A., Ka A., **Saqalli M.** 2016. Panarchie dans le Sahel : l'initiative de la Grande Muraille Verte au prisme des relations d'influence entre acteurs. *Emulations, Revue des jeunes chercheurs et chercheuses en Sciences Sociales*, 20.
70. [C-ACTI] Pelaez J. I., Vaccaro G., Yanez E., **Saqalli M.** 2016. Un Sistemas para Detección de Contaminación por Hidrocarburos: Aplicación al Oriente Ecuatoriano. CISC Orlando 2016 (*Best article*).
71. [C-ACTI] Durango J., **Saqalli M.**, Maurice L., Elger A. 2016. Heterogeneous data mining for a semi-quantitative risk assessment of oil contamination from multiple-sources in the Ecuadorian Amazon. IEMS Conference Toulouse.
72. [C-ACTI] Chapotat W., Houssou L. J. N., **Saqalli M.**, Gaudou B., Lerigoleur E., Maestriperieri N., Bouadji-Boulic A. 2016. An agent-based model of the Amazonian forest colonization and oil exploitation: The Oriente study case. IEMS Conference Toulouse.
73. [C-COM] **Saqalli M.** Maestriperieri N., Saenz M. Belem M. The world is not enough: pleading against the data gap postulate for building interdisciplinary research actions. Actes des rencontres de Rochebrune. 02/2016.

2015

74. [ACL] **Saqalli M.**, Jourdren M., Maestriperieri N., Guillerme S., Maire, E., Soullileuth B., Latsachach K., Sounyafong P., Louy Tammahuxsa L., Sengtaheuanghoung O., Ribolzi O., Becerra S. 2015. Backward waters, modern waters: Spatializing territory uses and water-related sanitary stakes through regional mappings based on the perceptions of local stakeholders in the area around Luang Phabang (Lao PDR), *Applied Geography*, 60, 184-193.
75. [ACL] **Saqalli M.** 2015. Review of "Understanding society and natural resources: Forging new strands of integration across the social sciences" by Michael J. Manfreda, Jerry J. Vaske, Andreas Rechkemmer, Esther A. Duke (eds.). *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 18, 1.
76. [DO] Béringuier P., Blot F., Desailly B., **Saqalli M. (Eds.)** 2015. Environnement, pratiques locales et politiques publiques. *L'Harmattan*
77. [OS-C] Béringuier, P., Blot, F., Desailly, B., Peltier, A., **Saqalli, M.** 2015. Introduction générale. In : Dynamiques Environnementales, Pratiques Sociales et Politiques Publiques. L'Harmattan, Paris, Toulouse, France, 11–22.
78. [OS-C] **Saqalli M.** 2015. Le choc des savoirs. In : Dynamiques Environnementales, Pratiques Sociales et Politiques Publiques. L'Harmattan, Paris, Toulouse, France, pp. 24–26.
79. [OS-C] **Saqalli M.**, Baum T. 2015. Pathways for scale reconciliation: Building ecological socio-modelling methodologies for a reconstitution of human past dynamics over a landscape. In: Chap. 8. Barceló J. A., Del Castillo F. (eds.) Simulating prehistoric and ancient worlds. Springer Computational Social Sciences. 233-255.

80. [OS-C] Boussetta, A., **Saqalli, M.**, Maestripiéri, N., Rejeb, H. 2015. Le zonage à dire d'acteurs un outil en faveur de l'éco-paysage : Mornag et Jebel Ressass. In : Rejeb, H. (éd.). *Alternatives éco paysagères dans les régions méditerranéennes*. Ouvrage Interuniversitaire transdisciplinaire Editions ISA Chott-Meriem.
81. [OS-C] Salavert A., Bréhard S., Bendrey R., Baly I., Duval J., Renard M., **Saqalli M.**, Dubouloz J., Tresset A., Vigne J.-D. 2015. Cultivation and animal husbandry during the LBK, from the household to the macro-regional scales. In: Bocquet-Appel J.-P., Moussa R. (eds.) Springer.
82. [C-COM] Belem M., Maestripiéri N., Sáenz M., **Saqalli M.** 2015. Integrated assessment modelling of environmental impacts of land use policy in West Africa: A conceptual model. Conférence SAGEO, Hammamet, Tunisie, 11/2015.
83. [C-COM] Boussetta A., **Saqalli M.**, Maestripiéri N., Rejeb H. 2015. Le zonage à dire d'acteurs, un outil en faveur de l'éco-paysage de la zone de Mornag- Jebel Ressass. Conférence SAGEO, Hammamet, Tunisie, 11/2015.
84. [C-COM] **Saqalli M.**, Maestripiéri N., Sáenz M., Belem M. 2015. The need of tearing down the walls between disciplines and emphasize transdisciplinary approach within a multidimensional framework. Conférence SAGEO, Hammamet, Tunisie, 11/2015.
85. [C-COM] Boussetta A., **Saqalli M.**, Maestripiéri N., Rejeb H. 2015. Ruralité et systèmes de productions : Une approche géographique par les Zonages à Dires d'Acteurs (ZADAs). Conférence Alternatives Ecopaysagères, Sousse, Tunisie. 05/2015.
86. [C-AFF] **Saqalli M.** 2015. Simple is beautiful? Building a simple climate model for modelling archaeological issues. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère 01/2015, Toulouse, France

2014

87. [ACL] **Saqalli M.** Salavert A., Bréhard S., Bendrey R., Vigne J.-D., Tresset A. 2014. Revisiting and modelling the woodland farming system of the early Neolithic Linear Pottery Culture (LBK), 5600–4900 B.C. *Vegetation History and Archaeobotany* 23, 1: 37-50.
88. [C-ACTI] **Saqalli M.**, Kaplan J. O., Baum T., Lemmen C. 2014. Reconstituting human past dynamics over a landscape: pleading for the co-integration of both microvillage-level modelling and macro-level ecological socio-modelling. SSC'14 Social Simulation Conference European. SPUHH: Simulating the Past to Understand Human History, Barcelona, Spain, 04/09/2014.
89. [C-ACTI] Maestripiéri N., **Saqalli M.**, Becerra S., Munoz M., Ribolzi O. 2014. Assessing a health risk thanks to regional mappings based on local perceptions: A comparative study of three different hazards in three sites: Laos, Tunisia and Ecuador. 3rd International Congress on Environmental Health (ICEH2014), Porto, Portugal, 25/09/2014.
90. [C-COM] **Saqalli M.** 2014. Sociétés rurales du passé : Approche par la Modélisation multi-agents. Séminaire Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249 CNRS Université de Franche-Comté, Besançon, 11/02/2014
91. [C-COM] **Saqalli M.** 2014. le Zonage à Dires d'Acteurs, un outil de cartographie basé sur la perception locale : présentation et usages. Séminaire PEPS SOLIDER Atelier 2, Université Paris Diderot, Paris, 14/02/2014

2013

92. [ACL] **Saqalli M.** Biolders C. L., Defourny P., Gérard B. 2013. Reconstituting family transitions of Sahelian western Niger 1950-2000: an agent-based modelling approach in a low data context, *Cybergeo: European Journal of Geography* 634.
93. [C-ACTI] Becerra S., **Saqalli M.**, Gangneron F., Dia A. H. 2013. Ordinary vulnerabilities and responses, future adaptability to water crises in the Malian Sahel (Gourma). Conférence Interactions Politiques publiques, dynamiques environnementales et pratiques sociales, Uté Toulouse 2 Jean Jaurès, France, 06/2013.
94. [C-ACTI] **Saqalli M.**, Jourden M., Maestripiéri, N., Guillerme S., Maire, E., Souleilouth B., Latsachach K., Sounyafong P., Thammahuxsa L. C., Sengtaheuanghoung O., Ribolzi, O., Becerra S. 2013. Backward waters, modern waters: Spatializing territory uses and water-related sanitary stakes through regional mappings based on the perceptions of local stakeholders in the area around Luang Phabang (Lao PDR). Conférence Interactions Politiques publiques, dynamiques environnementales et pratiques sociales, Uté Toulouse 2 Jean Jaurès, France, 06/2013.
95. [C-COM] **Saqalli M.**, Mouri H., Becerra S., Munoz M., Abdessamad I., Touati M. 2013. Le Zonage à Dires d'Acteurs, un outil de diagnostic et d'analyse des interactions entre Hommes et Territoire : Perception des

risques de contamination autour du Jebel Ressay. Séminaire annuel Programme MISTRALS SICMED COMETES, Sousse, Tunisie, 29/10/2013.

96. [C-COM] **Saqalli M.** 2013. Modelling the past farming systems: implied methodologies and issues. Modeling the Past – Predictive Approaches to Climate, Environment, Population and cultural Dynamics in Prehistory Workshop Berlin, Allemagne 11/2013.
97. [C-AFF] Djohy G., **Saqalli M.**, Edja H., Houinato M. 2013. Jeu d'urbanisation et contingence dans le Bénin décentralisé : Cas de la municipalité de Parakou. 30/07/2013. Journées Doctoriales de l'Université de Cotonou, Bénin.

2012

98. [C-COM] Bocquet-Appel J.-P., **Saqalli M.**, Dubouloz J., Berger J.-F., Vigne J.-D., Tresset A., Schwartz D., Salavert A., Ertlen D., Gauvry Y., Ortu E., Sanchez Goñi M.-F., Finsinger W., Dormoy I., Demoule J.-P., Carcaillet C., O'Connor M. 2012. Multi-agent simulations of the trajectory of the LBK Neolithic. Conf. Early Farmers: the view from Archaeology and Science, U^{tv} of Cardiff, UK, 05/2012.
99. [C-COM] **Saqalli M.**, Salavert A., Bréhard S., Bendrey R., Dubouloz J., Bocquet-Appel J.-P., Vigne J.-D., Tresset A. 2012. Contribution of archaeozoology and archaeobotany to a multi-agent system mimicking the LBK society (Central Europe, 6th-5th millennia BC). Conf. Early Farmers: the view from Archaeology & Science, U^{tv} of Cardiff, UK, 05/2012.
100. [C-COM] Becerra S., **Saqalli M.**, Gangneron F., Dia A. H. 2012. Hey! Mrs Jerrycan! Ordinary vulnerabilities and responses, resistance, resilience and adaptation to water crises in the Malien Sahel (Gourma). Conf. AMMA 2012 Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine, U^{té} Toulouse 2 Jean Jaurès, Toulouse, France, 07/2012.
101. [C-COM] **Saqalli M.** 2012. Sahels North, Sahels South: Building human indicators of a relative desertification. Conférence AMMA 2012 Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine, U^{té} Toulouse 2 Jean Jaurès, Toulouse, France, 07/2012.
102. [C-COM] **Saqalli M.**, Salavert A., Ertlen D., Moussa R., Bocquet-Appel J.-P. 2012. Permanent vs. shifting cultivation: the farming system of Neolithic LBK (7800-6900 BP). Third Inter-national Schöntal Conference Farming in the Forest Ecology & Economy of Fire in Prehistoric Agriculture, Klöster Schöntal, Allemagne 07/2012.
103. [C-COM] **Saqalli M.**, Salavert A., Ertlen D., Moussa R., Bocquet-Appel J.-P. 2012. Modeling a typical LBK hamlet functioning at the household level. 3rd International Schöntal Conference Farming in the Forest Ecology & Economy of Fire in Prehistoric Agriculture, Klöster Schöntal, Allemagne 07/2012.
104. [C-COM] **Saqalli M.** 2012. Sociétés rurales : Paradigmes associés et Approches par la Modélisation multi-agents. Observatoire Hommes-Milieus Tessékéré CNRS UCAD, 27/08/2012 Widou-Thiengoli, Sénégal.

2011

105. [ACL] Neumann M., Braun A., Heinke E.-M., **Saqalli M.**, Srblijinovic A., Wijermans N. 2011. Challenges in modeling social conflicts: Grappling with polysemy. *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*, 40, 1.
106. [ACL] **Saqalli M.**, Dosso M. 2011. Draped heterogeneity, forced uniformity: when agro-environmental policies drive family evolutions: The U Minh Thượng forest reserve, Mekong delta, Vietnam. *Field Actions Science Reports*, 5.
107. [ACL] **Saqalli M.**, Gérard B., Biolders C.L., Defourny P. 2011. Targeting rural development interventions: Empirical agent-based modeling in Nigerien villages. *Agricultural Systems*, 104, 4, 354-364.

2010

108. [ACL] Van Vliet N., Milner-Gulland E.J., Bousquet F., **Saqalli M.**, Nasi R. 2010. Effect of Small-Scale Heterogeneity of Prey and Hunter Distributions on the Sustainability of Bushmeat Hunting. *Conservation Biology*, 24, 5, 1327-1337.
109. [ACL] **Saqalli M.**, Gérard B., Biolders C.L., Defourny P. 2010. Testing social-driven family forces on the evolution of Niger Sahelian rural farming systems: A combined agent-based modelling & anthropological approach. *Ecological Modelling*, 221, 2714-2727.
110. [ACL] **Saqalli M.**, Gérard B., Biolders C.L., Defourny, P. 2010. Simulating rural environmentally and socio-economically constrained multi-activity and multi-decision societies in a low-data context: a challenge through empirical agent-based modeling. *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*, 13, 2.
111. [ACL] **Saqalli M.**, Thiriou, S., Amblard, F. 2010. Investigating social conflicts linked to water resources through agent-based modelling. *NATO Science for Peace & Security Series*, 75, 142-157.

112. [C-COM] Bocquet-Appel J.P. **Saqalli M.** 2010. *Modélisation multi-agents d'une société archéologique des premiers agriculteurs européens* Décembre 2010. Journées Scientifiques de la Section des Sciences de la Vie et de la Terre de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, Paris France
113. [C-COM] **Saqalli M.** 2010. *Uncertainty in assessing & modelling social changes in rural areas*. Novembre 2010. 3^{ème} ESSA Special Interest group on Social conflicts. Aix-la-Chapelle, Allemagne.
114. [C-COM] **Saqalli M.** 2010. *Variables, methods & data for agro-ecological & socio-economic integration*. Novembre 2010. "ICRAF Global Futures project workshop: Enhancing modelling capability and empirical data to assess the economic impacts of agroforestry and other natural resource management interventions", Nairobi, Kenya.

2009

115. [ACL] **Saqalli M.**, Caron P., Defourny P., Issaka A. 2009. The PBRM (perception-based regional mapping): A spatial method to support regional development initiatives. *Applied Geography*, 29, 358-370.
116. [DO] **Saqalli M.** 2009. *Little houses in the Sahel: Social and environmental transitions in Sahelian Niger*, Verlag Dr Müller, Saarbrücken.
117. [C-ACTI] Van Vliet, N., Nasi, R. Bousquet, F. **Saqalli, M.**, Milner-Gulland EJ. 2009. Where and when we hunt counts more than how much we hunt: A case study on bay duikers in Northeast Gabon using a multi-agent system. September 2009. 6th Conference ESSA, Guilford, U. K.
118. [C-ACTI] **Saqalli, M.** 2009. Testing social-driven forces on the evolution of Niger Sahelian rural farming socio-systems: A combined agent-based modelling and anthropological approach. September 2009. Sixth Conference ESSA, Guilford, U. K.
119. [C-ACTI] **Saqalli, M.**, Thiriou S., Amblard, F. 2009. *Water-related social conflicts: an analysis through agent-based modelling*. 11/12/2009. Complex societal dynamics: Security challenges & Opportunities, NATO ARW Zagreb, Croatie.
120. [C-COM] Becerra S., Dia A.H., Gangneron F., **Saqalli, M.** 2009. *Madame ! Bidon ! Vulnérabilités & adaptations face aux crises de l'eau dans le Gourma Malien*. 3^{ème} Conférence AMMA, Juillet 2009, Ouagadougou, Burkina Faso.
121. [C-COM] **Saqalli M.** 2009. Populations, systèmes agraires & transitions sociales au Sahel nigérien : modéliser dans un contexte à faible disponibilité de données, 24/02/2009 Séminaire INRA AGIR, Campus d'Auzeville, Toulouse, France.
122. [C-COM] **Saqalli M.** 2009. Contexte de la gestion de l'eau dans le Bassin Adour Garonne, 03/04/2009 Séminaire Projet RTRA MAELIA, UMR 5563 GET, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France.
123. [C-COM] **Saqalli M.** 2009. Modélisation des conflits sur les ressources naturelles renouvelables : Etat de l'art et concepts envisagés, 19/08/2009 Séminaire Projet RTRA MAELIA, UMR 5563 GET, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France.
124. [PV] **Saqalli M.** 2009. Modèle multi-agents & méthodologie conjointe de modélisation et d'enquêtes terrain pour l'étude des relations chasseurs –ressources faunistiques dans deux petites régions forestières du Gabon et du Cameroun. Rapport CIFOR : 22 p.
125. [C-AFF] **Saqalli M.**, Gérard B., Defourny P., Biélers Charles L. 2009. Une approche multi-agent combinant modélisation sociale et enquêtes anthropologiques pour l'analyse de l'impact de forces sociales sur les évolutions de populations rurales au Sahel nigérien. 3^{ème} Conférence AMMA, Juillet 2009, Ouagadougou, Burkina Faso. biblio.amma-international.org/

2008

126. [ACL] **Saqalli M.** 2008. Le pouvoir des savoirs : Enjeux et impacts de conceptions sur le développement rural pour le Sahel nigérien. *VertigO*, 8, 1.
127. [C-ACTI] **Saqalli M.**, Gérard B., Biélers C., Defourny P. 2008. *Marketing humanitarian support: Empirical agent-based modeling of development actions in Nigérien villages*. 5^{ème} Conférence ESSA. Septembre 2008. Brescia, Italie.
128. [PHD] **Saqalli M.** 2008. Populations, farming systems and Social transitions in Sahelian Niger : An Agent-based Modeling approach, Thèse de Doctorat de Sciences du Milieu et de l'Aménagement du Territoire, Université catholique de Louvain (Louvain-la-Neuve, Belgique). Thèse téléchargeable sur www.padniger.net
129. [C-COM] **Saqalli M.** 2008. Populations, systèmes agraires & transitions sociales au Sahel nigérien : une approche par modèle multi-agent, 31/10/2008 Séminaire CIRAD-GREEN, Montpellier, France.
130. [PV] **Saqalli M.** 2008. Fiches techniques ICRAF n°7 : Méthode Accélérée de Recherche Participative (MARP) ; n°8 : le Zonage à Dires d'Acteurs (ZADA) ; n°11 : Modélisation de propositions de Développement :

le Warrantage et la mise à disposition d'engrais inorganique ; n°12 : SimSahel : une modélisation multi-agents de trois terroirs nigériens.

131. [C-AFF] **Saqalli M.** 2008. Agent-based Modeling as an action-oriented tool to integrate the complexity of rural communities: the case of Sahelian Niger rural villages. Conférence ESM, Le Havre, France.

2007

132. [C-COM] **Saqalli M.** 2007. *Paysans du Niger : évolution et résilience de paradigmes sur le développement rural*. 23^{èmes} Journées du Développement de l'Association Tiers-Monde. Mai 2007, Mons, Belgique.

2006

133. [C-ACTI] **Saqalli M.** 2006. Multi acteurs, multi activités : Simulations multi agents pour la détection des changements dans l'Organisation sociale dans les villages de l'ouest nigérien. 6^{ème} MOSIM'06. Rabat, Maroc.
134. [C-ACTI] **Saqalli M.** 2006. Rural systems in Sahelian Niger: evolution & constraints for development. 2nd TACSS. Décembre 2006, Istanbul, Turquie.
135. [C-COM] **Saqalli M.** 2006. *Modéliser des actions de développement rural dans un village du Sahel. Contraintes méthodologiques & résultats*. Journée doctorale du Département des sciences de la population et du développement (SPED). Février 2006, Louvain-la-Neuve, Belgique.
136. [C-COM] **Saqalli M.** 2006. Modélisation multi-agents : séminaire activités 2005. 22/03/2006 Séminaire DGCD-ICRISAT, Niamey, Niger.
137. [C-COM] **Saqalli M.** 2006. Modélisation Multi-Agents : des outils pour modéliser des dynamiques sur les ressources naturelles. 25/04/2006 2005 Séminaire Université Catholique de Louvain MILA, Louvain-la-Neuve, Belgique.
138. [C-AFF] **Saqalli M.** 2006. Understanding social constraints in Sahelian Niger communities as a decision-support tool for development operators. IYDD. International Year of Deserts and Desertification Conference "Desertification: Migration, Health, Remediation and Local Governance". Septembre 2006, Bruxelles, Belgique.

2005

139. [C-COM] **Saqalli M.** 2005. Modélisation multi-agents : séminaire activités 2004. 25/05/2005 Séminaire DGCD-ICRISAT, Niamey, Niger.
140. [C-COM] **Saqalli M.** 2005. Du terrain au modèle : enquêtes et modélisation des activités et des dynamiques de la population d'un village du Niger. 25/05/2005 Séminaire Université Catholique de Louvain MILA, Louvain-la-Neuve, Belgique
141. [C-COM] **Saqalli M.** 2005. Le zonage à dire d'acteurs Méthodologie et Résultats. Séminaire 15/11/2005 Séminaire Université Catholique de Louvain MILA, Louvain-la-Neuve, Belgique
142. [AP] **Saqalli M.** 2005. Rapport final sur les activités et résultats liés aux Zonages à Dires d'Acteurs (ZADA) réalisés sur les deux sites du Fakara et du Damagaram. Rapport ICRISAT. 37p.
143. [AP] **Saqalli M.** 2005. Rapport final sur les activités et résultats liés aux Méthodes Accélérées de Recherche Participative (MARP) réalisées sur les deux sites de Gabi et de Zermou. Rapport ICRISAT. 122 p.

2004

144. [C-COM] **Saqalli M.** 2004. Modélisation de l'organisation sociale d'un village nigérien. 06/01/2004, Séminaire Université Catholique de Louvain MILA, Louvain-la-Neuve, Belgique
145. [C-COM] **Saqalli M.** 2004. Formes de modélisation et Méthodes d'Enquête des relations entre acteurs, une application à des terroirs villageois nigériens. 27/01/2004 Séminaire DGCD-UCL-ICRISAT, Niamey, Niger
146. [C-COM] Akponikpè P. B. I., **Saqalli M.**, Marinho Filho E. A., Biolders C., Defourny P., Gérard B., Gaspard F. 2004. Développement d'outils d'aide à la décision des opérateurs sur des terroirs villageois nigériens. Séminaire Désertification & Durabilité au Sahel, 09/03/2004, Séminaire Université Catholique de Louvain MILA, Louvain-la-Neuve, Belgique.
147. [C-COM] Akponikpè P. B. I., **Saqalli M.**, Marinho Filho E. A., Biolders C., Defourny P., Gérard B., Gaspard F. 2004. Development of decision- support tools for development operators in village communities in Sahel (Niger), DSS 05/2004, Séminaire DGCD, Bruxelles, Belgique.
148. [C-COM] **Saqalli M.** 2004. Modélisation multi-agents : application à la gestion des ressources naturelles. 14/11/2004 Séminaire AGRHYMET, Niamey, Niger
149. [AP] **Saqalli M.** 2004. Etat des lieux et programme d'avancée du réseau des radios rurales au Niger. Rapport ICRISAT. 13 p.

2003

- 150. [C-COM] **Saqalli M.** 2003. Hétérogénéité du milieu, homogénéité imposée d'un modèle agricole : La zone tampon de la réserve de U Minh Thùong (delta du Mékong, Vietnam). Séminaire Université Catholique de Louvain MILA, Belgique 20/03/2003
- 151. [C-COM] **Saqalli M.** 2003. Des productions agricoles. Et ensuite... ? Séminaire Master Agriculture. Faculté Universitaire Agronomique de Gembloux, Belgique 03/07/2003
- 152. [C-AFF] Gérard B., **Saqalli M.** 2003. Improved livelihoods in the Sahel through the development and implementation of household level bio-economic decision support systems (2003-2007): A collaborative project funded by the Directorate-General for Development Cooperation. Séminaire annuel de la Coopération belge, Juillet 2003, Bruxelles, Belgique.

2002

- 153. [C-ACTI] **Saqalli M.,** Dosso M. 2002. Hétérogénéité cachée du milieu, homogénéité imposée d'un modèle de mise en valeur agricole : Le cas de la zone tampon de la réserve forestière d'U Minh Thùong (delta du Mékong, Vietnam) 1^{er} SAGERT. 10/05/2002, Montpellier, France.
- 154. [PV] **Saqalli M.** 2002. Moringa oleifera, arbre multi-usages, multi-milieus. People & Plant www.plantbyplant.com/saq/saqind.htm
- 155. [AP] **Saqalli M.** 2002. *Etat des lieux et comparaison des phénomènes de désertification sur deux territoires au Maroc et au Niger.* Etude commandée par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable auprès de l'Observatoire du Sahara et du Sahel, Programme OSS-ROSELT. 88 p. + annexe.
- 156. [C-AFF] **Saqalli M.** 2002. Arbres à usages multiples en zone rurale soudano-sahélienne : Intérêts, potentialités et déceptions. Exposition CNEARC-IRD-ENGREF, Décembre 2002, Montpellier, France.
- 157. [C-AFF] **Saqalli M.** 2002. Le Mlonge en Tanzanie. Exposition CNEARC- NUNKUI "la forêt nourrit". Octobre 2002, Montpellier, France.
- 158. [C-AFF] **Saqalli M.** 2002. "On doit laisser le tigre endormi" : Gestion des alluvions dans le delta du Mékong. 1^{er} SAGERT. Juin 2002, Montpellier, France.

2001

- 159. [MSC] **Saqalli M.** 2001. Limitations et conflits autour de la promotion de Moringa oleifera, Province de Tanga, Tanzanie. Optima of Africa/ Sokoïne Uty / Dar Es-Salaam Uty, Mémoire CNEARC -ENGREF.

2000

- 160. [C-COM] Ndedji C., Diop B., **Saqalli M.** 2000. *Urbain et Rural / Dynamiques villageoises engendrées par un projet d'aménagement des ressources naturelles en Centrafrique.* Séminaire Agroforesterie en milieu tropical ENGREF, Janvier 2000, Montpellier, France.
- 161. [AP] Bedel, J. **Saqalli, M.** Charbonnier V. 2000. Impacts d'un programme de Gestion des Ressources Naturelles sur les villages de la zone tampon du parc du "W" In Bedel J. Ed. : Evaluation des conflits et des enjeux autour de la gestion du parc du W, Niger, rapport d'évaluation ECOPASS UNESCO / ENGREF. 27 p.

1999

- 162. [C-COM] **Saqalli M.,** Trouillard K., Grimaud J., Sorhaitz E., Ouedraogo M. 1999. *Agriculteur dans le Trièves (Isère) : Parcours de vie, itinéraire technique et économique.* Séminaire des Etudes & Travaux du CNEARC. Avril 1999, Montpellier, France
- 163. [MSC] **Saqalli M.** 1999. Perspectives de développement de la zone tampon agroforestière de la réserve naturelle d'U Minh Thùong, Province de Kiên Giang, Viêt-Nam. Hô Chi Minh Uty /CARE Viêt-Nam, Mémoire CNEARC.

1998

- 164. [MSC] **Saqalli M.** 1998. Gestion des ressources et analyse des systèmes d'élevage sur les districts de Kambashe et Imiqhayi, ex-bantoustan du Ciskei, Eastern Cape, Afrique du sud. CIRAD-TERA/ ARC/ Fort Hare Uty, Mémoire Paris 1 Panthéon Sorbonne IEDES -INA-PG.

3 Résultats scientifiques : Les systèmes socio-écologiques ruraux modélisés

3.1 Introduction

3.1.1 Remettre *anthropos* sur la scène

L'anthropocène se définit communément comme l'ère où l'espèce humaine est la principale force de transformation de la surface de la planète. Si la force principale concernée était les ouragans, on étudierait les origines des ouragans, les facteurs affectant les puissances des différents ouragans, les impacts des ouragans. Étrangement, pour ce facteur étrange qu'est l'homme, on n'étudie ni les origines de cette force, ni les facteurs affectant la puissance de transformation des diverses communautés humaines sur leur territoire. On regarde les impacts, on appelle à plus d'interdisciplinarité et d'intégration de la composante humaine puis on s'arrête là : « Les accidents de la route, c'est grave. Par conséquent, n'étudions pas les conducteurs. ».

Au sens large, mes travaux de recherche ont pour fil directeur et pour objet principal de répondre à ce manque : évaluer la puissance et comprendre la manière dont les variables caractérisant les systèmes socio-écologiques, qui conditionnent l'action de l'homme sur un territoire rural, déterminent le devenir de ces mêmes systèmes. Autrement dit, des facteurs sociologiques et économiques sont déterminants voire priment pour comprendre le comportement de la principale force transformatrice des systèmes socio-écologiques, l'homme lui-même. Même s'ils ne sont connus actuellement que de manière qualitative, alors ils devraient être le principal objet d'étude de ces systèmes socio-écologiques car ils expliquent le passé de ces systèmes, leur présent et leur avenir. Il faut donc aller les lister, les inventorier sur place, les évaluer, en rendre leur poids dans le devenir du système même de manière approximée (mais pas approximative). Bref, mettre tout ce qui importe dans le devenir des socio-écosystèmes en lumière et en comparaison. Cependant, plusieurs questions somme toute bien pratiques se posent pour étudier cette force qu'est l'homme comme on étudierait une force naturelle :

Une société humaine ne répond pas entièrement aux principes d'actualisme (Grimoult, 2000) : les comportements des sociétés ont un spectre bien large, où se combinent d'une part variabilité du milieu, des modes de production reliant système écologique, capital technique et système social pour former un système agraire (Mazoyer & Roudart, 1997) et fonctionnements familiaux, sociaux et politiques d'autre part pour former une société. Cela veut dire en pratique qu'on ne peut analyser les Systèmes socio-écologiques ruraux (qu'on dénommera dorénavant SSER) sur une paillasse, chaque situation pouvant être considérée comme la combinaison située de paramètres aux valeurs uniques. On se retrouve entre deux extrêmes :

- Les systèmes écologiques, non compris l'homme, répondent aux lois de la nature, immuables et uniformes dans l'espace, au moins dans l'intervalle historique du Néolithique à nos jours : les espèces n'ont pas forcément évolué et les mêmes conditions du biotope définiront le fonctionnement de la biocénose et par là de la biosphère. On comprend alors qu'étudier les systèmes écologiques sans action de sociétés humaines a une portée plus « universelle » : les contraintes, conditionnalités et dynamiques environnementales peuvent être considérées et approximées pour d'autres territoires que celui étudié. Ainsi, pluies et température sont universelles et c'est leur valeurs et leurs cycles qui créent des différences locales ;
- De l'autre côté, les sociétés humaines non conditionnées directement par les mécanismes environnementaux, comme les sociétés urbaines ou les sociétés agro-industrielles ont une gamme bien plus large, en tout cas plus difficile à circonscrire dans une approche formelle de modélisation ;
- Reste finalement les Sociétés rurales vivrières ou semi-vivrières, dépendantes des activités liées aux ressources naturelles. Agriculture, élevage, chasse, pêche, cueillette sont conditionnées par les systèmes écologiques dont elles dépendent, des règles et normes sociologiques et anthropologiques qui les meuvent mais aussi aux conditionnalités agronomiques, techniques et économiques (au sens d'économie des ressources) de la production des systèmes agraires Par exemple, sarcler un 1 ha à la main prendra plus d'une journée dans un système agrotechnique non mécanisé, quasiment partout sur Terre.

On comprend alors qu'il est plus facile, et plus précisément moins hasardeux d'étudier des sociétés rurales que des sociétés urbaines, car les premières sont conditionnées par des règles biophysiques plus « assurées » et plus encore si leur pérennité, voire leur survie, sont conditionnées uniquement par le fonctionnement des systèmes de production et d'activité, sans recours possibles déterminants comme les échanges de nourriture et des

productions de rente. Ainsi, en raison des diverses contraintes que les agriculteurs avaient et ont encore, qui se retrouvent d'un système agraire à l'autre avec des poids légèrement différents d'un lieu à l'autre, on peut assumer qu'ils peuvent être analysés et modélisés.

Or, les sociétés ne sont devenues majoritairement urbaines que depuis la seconde Révolution Industrielle, soit moins d'un siècle (Mazoyer & Roudart, 1997) et pour la majeure partie des pays du Sud, moins de 50 ans. Depuis le Néolithique et l'apparition de l'agriculture jusqu'à cette révolution industrielle, elles ont toujours constitué la très grande majorité de l'humanité. Les socio-écosystèmes concernés, comme décrit par Mazoyer & Roudart (1997) ou Demoule (2010), ont vite concerné la quasi-totalité des biomes terrestres, dès le IV^{ème} millénaire avant JC. C'est cette population rurale vivrière, de fronts pionniers, de quasi-fronts pionniers et des systèmes agraires installés qui a réellement conquis la planète. Ainsi, nous parlons bien ici de la principale force écologique de la Biosphère, agissant par le biais de contraintes et de limitations biophysiques sur les différents territoires, écosystèmes et biomes du globe, tant en termes de puissance historique de transformation de la planète, d'encore principale composante de la population humaine, et historiquement ayant été le plus long système social non paléolithique de l'histoire. Ainsi, non seulement ces systèmes socio-écologiques ruraux peuvent être modélisés, mais ils valent la peine de l'être, compte tenu de l'impact sur la biosphère et de leur importance dans l'histoire.

Ainsi, formaliser les systèmes socio-écologiques locaux, c'est reconstituer le principal socio-écosystème de l'Humanité dans la plus grande part de son histoire et de sa population depuis la naissance de l'Agriculture, avec les risques et les incertitudes de cette interaction mais aussi avec la sécurité alimentaire que procurait des milieux à faible densité de population !

Pour ce faire, formaliser ces dynamiques revient à se poser la question de la possibilité même de saisir l'étonnante diversité des fonctionnements sociaux et économiques des sociétés du passé et du présent et de voir s'il est possible de les appréhender, de les formaliser et donc, de les modéliser.

3.1.2 Problématique(s) scientifique(s)

Derrière l'apparente évidence de l'intérêt de l'approche du point de vue thématique, à savoir comprendre le fonctionnement et la variabilité des systèmes socio-écologiques passés et présents, se rajoute de facto un intérêt méthodologique et épistémologique : la formalisation d'une démarche permettant d'intégrer en pratique les aspects socio-anthropologiques, et en particulier les variables que l'on appréhende habituellement de manière qualitative sur le terrain dans la compréhension des SSERs : je pense qu'ils sont fondamentaux dans la compréhension de l'acteur humain. On ne peut donc éviter de devoir construire formaliser et mettre enfin à plat cette approche d'intégration au-delà du mantra de l'interdisciplinarité rarement mise en pratique :

1. Cela suppose de questionner la manière dont les méthodes d'investigation socio-anthropologique d'appréhension du réel, sur le terrain, peuvent être « traduits » dans des approches formelles, « quantifiantes », comme des modèles.
2. Cela signifie mettre à plat cette formalisation elle-même, des composantes de ces SSER et ainsi distinguer au sein de la démarche de compréhension ainsi posée les éléments qui la composent, entre indicateurs, informations, critères, variables et données d'une part et inventaire, formulation d'hypothèses, recueil, conceptualisation, évaluation, estimation, calibration, tests et scénarisation d'autre part.
3. Cela suppose enfin tester la valeur de cette démarche de formalisation afin d'en éprouver la généralité dans le temps et dans l'espace, pour des SSER variés tant dans les biomes que dans les sociétés qui les meuvent.

Mon doctorat se situait dans un entre-deux. La modélisation des contraintes affectant les agropasteurs était devenue par obligation de rigueur scientifique une tentative de formalisation des liens socio-anthropologiques et des interactions qui rythment et conditionnent de manière différente familles et individus, tous différents face à l'accès aux aménités et ressources pour la simple raison que ce sont bien ces liens qui sont prédominants dans les rationalités, les pratiques et par là les transformations humaines du territoire et des ressources. Cette transformation n'avait aucune origine idéologique par exemple par populisme idéologique (Olivier de Sardan, 1990 ; 1996 ; 2003a, 2008).

Des contraintes personnelles m'obligeant à choisir la recherche plus que la recherche-développement, les deux postdoctorats étaient deux explorations de terres inconnues assez dispersées². Pour autant, la généralité de l'approche élaborée en doctorat conférait un cadre méthodologique formel d'intégration de dimensions sociales peu envisagé dans les projets concernés. Cette approche, combinée à un certain pragmatisme revendiqué mais qu'il s'agissait d'élaborer pour une meilleure intégration formelle, a permis également une certaine opérationnalité dans la hiérarchisation des priorités entre actions de recherche.

Avec ces différentes casquettes, mon recrutement au CNRS en 2011, vu par moi comme inespéré, a ouvert des perspectives de recherche tous azimuts sur de nombreux sujets, tant du passé que de l'actuel, tant dans les Pyrénées qu'en pays du Sud, rempli d'enthousiasme et de questionnements. Entré au Laboratoire GEODE Géographie de l'Environnement le 15 octobre 2011, mes recherches sur cette approche d'intégration des variables sociales par la modélisation devaient s'intégrer initialement dans différentes actions déjà lancées. En pratique, il s'est agi de s'insérer dans des projets finalement extérieurs au laboratoire afin de tester et de faire progresser in vivo cette approche combinée.

Mon entrée au laboratoire GEODE s'est faite au sein d'un axe nommé «Modélisation géomatique des dynamiques environnementales» représenté alors d'abord par la géomatique et la prospective spatialisée et n'a pas permis d'inscrire l'approche d'intégration des Sciences sociales dans cet axe. La disparition de celui-ci en 2016 suite au départ de son responsable vers d'autres cieux m'a fait transférer vers l'Axe 2 alors appelé «Dynamiques et enjeux contemporains des environnements et des paysages». Il a fallu attendre 2018 pour me voir autorisé à être membre de l'axe 1 «Paléo-environnements, Écologie Historique et Sociétés» et 2019 pour la prise de direction de l'axe 2, avec Frédérique Blot, prévue pour le nouveau quadriennal 2021-2025, et ce, en contribuant fortement à la rédaction du bilan du mandat 2015-2020 et à la définition des projets des axes 1 et 2. Hors mon laboratoire, il s'agissait d'insérer cette approche dans des réseaux et des projets de recherche existants, portant finalement plus facilement sur les pays du Sud où mon expérience était plus facilement reconnue, via les projets annuel PEPS du CNRS (PEPS MIASMES), le réseau MISTRALS SICMED puis le projet ANR MONOIL, porté par le GET, auquel j'avais fortement contribué dès sa conception dans son organisation et sa thématique. Ces actions structurantes m'ont permis de renforcer et d'élargir mes collaborations scientifiques dans le paysage scientifique toulousain (un encadrement de thèse pour chaque université), en particulier avec les universités toulousaines puis national et «franco-international» (au sens de la communauté de la recherche française portant sur les pays du Sud) d'une part, et de former et d'encadrer des étudiants en Master, en doctorat et postdoctorat d'autre part.

Ce parcours à la fois sinueux et décalé mais finalement cohérent dans son ensemble sera ici présenté via les résultats scientifiques qu'il a pu élaborer, produits de projets de recherches collaboratives au sein de communautés scientifiques fort éloignées en apparence dans chacune desquelles il s'agit de gagner une certaine légitimité. Trois communautés sont ainsi concernées : Le Sahel Africain, l'Amazonie et l'Europe Néolithique : ces trois ensembles constituent autant de territoires où l'humain était présent depuis longtemps mais où sa puissance de transformation a soudainement décuplé. D'autres espaces anciennement anthropisés comme la rive Sud de la Méditerranée ou le bassin du Mékong ont fait également l'objet de recherches et de missions de terrains plus ponctuelles dans le cadre d'autres projets auxquels j'ai participé. Je considère ici qu'ils doivent encore être positionnés en tant que terrain de recherche, n'ayant pas suffisamment travaillé sur eux.

3.1.3 Présentation du mémoire

Ainsi, mes travaux de recherche, s'ils apparaissent dispersés, peuvent se voir comme autant d'implications sur des terrains où se créent de nouveaux socio-écosystèmes et par lesquels s'évaluent la généralité de cette approche d'intégration des variables sociales que je promeus, à la croisée de la socio-anthropologie, de la géographie et de la modélisation. La présentation de ces résultats suivra ainsi une démarche ouverte, de la

² *D'une part, le système politique de la gestion de l'eau sur un bassin versant et la reconstitution des dynamiques de peuplement les systèmes agraires des rubanés, premiers Néolithiques en Europe du Nord d'autre part).*

formulation des questionnements à la présentation de la réflexion sur les enjeux méthodologiques, puis de l'approche qui en est ainsi déduite vers son application sur les trois grands terrains de prédilection :

A. La création des œkoumènes : présentation des cas de recherche

1. Les Sahels : Sur le seuil des petites maisons
2. Les Amazonies : le crépuscule des lances
3. Les Néolithiques : l'Europe, ce Nouveau Monde

B. Une approche d'intégration de la socio-anthropologie dans les démarches quantitatives

1. Des variables aux indicateurs
2. Une approche progressive des Socio-écosystèmes entre enquête participative et modélisation

Les résultats présentés ci-après sont une tentative de synthèse d'une partie de mes travaux de recherches ayant lien avec la thématique majeure de mon travail et faisant l'objet de publications, soit dans des revues, des conférences ou des ouvrages. Les références utilisées sont celles considérées comme illustrant le propos soit celles issues de mes propres travaux originaux montrant mon implication sur ces thèmes, ces dernières citées en fin de chacune des parties. L'ensemble des publications citées est listé en dernière partie bibliographie.



M. Saqalli, 2000

3.2 Les Sahels : La petite maison dans le Sahel



Le Sahel n'a pas été le premier terrain qui m'est venu en tête quand j'ai pensé, alors étudiant en master 2 au CNEARC, à l'idée de comparer les dynamiques anthropologiques et les « petites causes, grands effets » toutes choses égales par ailleurs. Je pensais alors aux grandes forêts équatoriales et me proposais de comparer les dynamiques de migration et de colonisation entre Congo, Kalimantan et Amazonie. Ma rencontre avec Antoine Cornet en mars 2001, alors directeur de l'IRD Montpellier et du CSFD³ a réorienté cette proposition vers le monde sahélien et l'équipe ROSELT, dirigée par Jean-Marc d'Herbès et Maud Loireau-Delabre, portée à la fois par l'IRD et l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). Quelques mois de travail en off, un an de contrat, une demande de bourse de doctorat rejetée par l'IRD malgré nombre de soutiens, divers petits contrats après, et me voilà en mars 2003 face à mon propre sujet de thèse, cette fois proposé par un projet de recherche et de développement, PAD (Projet Aide à la Décision : 2003-2007 avec prolongations⁴) portés par Charles Bielders, Pierre Defourny (Université catholique de Louvain) et Bruno Gérard de l'ICRISAT. Recruté, j'ai pu enfin commencer ma thèse (à quasiment 30 ans !).

J'ai bataillé alors pour garder une démarche à la fois personnelle et scientifique de focalisation sur les variables plutôt que sur des données. Il me fallait rester sur place pour comprendre comment ça fonctionne. Le Niger fut, au-delà d'une grande découverte personnelle, une période de vrai épanouissement scientifique et réflexif. Retour en 2006-2007 en Belgique puis en France pour rédiger et enfin soutenir mon doctorat en juin 2008. Il aura fallu ensuite près de 10 ans, en 2017 (hors une incursion en 2012), pour pouvoir retourner travailler dans la sous-région⁵ et au Sénégal en particulier dans le cadre de mon projet FERLOZAD accepté par l'OHM Tessékéré. Cette opportunité en a permis d'autres, grâce à mon ami et collègue Fabrice Gangneron, les projets RISE INSA, porté par C. Delon (2019-2023) et le projet ANR SWIMS, porté par L. Kergoat, en cours de soumission.

Cette petite rétrospective illustre la part essentielle de l'ensemble sahélien dans mon parcours de réflexion et au premier chef, le néologisme que je propose, le sociobiome⁶, pour désigner ce que serait un socio-écosystème ou SSER (Système Socio-Ecologique Rural) à une échelle beaucoup plus large, au-delà du village mais de ce qui appartient à une civilisation, son paysage et l'histoire de leurs interactions.

3.2.1 Variabilité intrinsèque, dynamique démographique : approche sociospatiale

Le Sahel n'a pas vocation à être pauvre ni en danger de famine ni en danger de désertification. Les chroniques des empires du Ghana, du Mali, du Kanem-Bornou, du Djolof, du Fouta Toro, du Songhaï, des cités-états Haoussa⁷ ne décrivent pas un monde en perpétuelle crise (Boilat, 1853; Busson & Clozel, 1913; Balandier, 1955; Hama, 1967; Johnston, 1967; Ki-Zerbo, 1972; Coquery-Vidrovitch & Moniot, 1974 ; Ega, 1983; Ajayi, 1985; Niane, 1985; Ogo, 1985; Gado, 1993; Raynaut et al. 1997 ; Olivier de Sardan, 2003b; Demont et al. 2004; M'Bokolo & Le Callennec, 2004; Ozainne et al. 2009).

L'usage d'un mot permettra de comprendre l'incongruité de la perception extérieure de cet immense territoire : « l'exode ». Ce terme, d'origine biblique quelque peu catastrophiste, provient de l'étude des migrations définitives vers la ville en Europe, l'exode rural. Il est pourtant employé pour l'Afrique de l'Ouest pour désigner des migrations saisonnières, allers-retours entre bassins d'emploi, le plus souvent en saison sèche quand on a

³ Comité Scientifique Français contre la Désertification

⁴ Financé par la Direction Générale de la Coopération, l'Agence de Coopération Belge

⁵ Expression courante pour l'Afrique de l'ouest francophone mais parfaitement impropre vue la taille de cet ensemble. On lui préfèrera nettement le terme « Sous-continent », plus exact et moins franco-centré.

⁶ Néologisme qui serait au biome sous-continental (le Sahel, le Soudan, la Pampa, la Méditerranée, l'Amazonie, etc.) ce qu'est le SSER (Système Socio-Ecologique Rural), traduction en français du SES (Socio-Ecosystems) rural à l'écosystème : une requalification pour intégrer le fait que même à ces échelles spatiales, tous les territoires tropicaux, équatoriaux et tempérés ont été co-construits par l'homme sur plusieurs millénaires.

⁷ Certes lacunaires, déformées, écrites par des visiteurs...

peu de chose à faire au village⁸, et lieux de résidence familiaux, le plus souvent en hivernage (Boyer & Mounkaïla, 2010). Cette dépréciation est soulignée plusieurs fois par Raynaut (1997) sur les SSER mais surtout par Olivier de Sardan (Biershenk et al. 2000 ; Olivier de Sardan, 1996 ; 2003a ; 2008 ; Olivier de Sardan et al. 2007) pour ce qui concerne les modes de vie. Deux points sont essentiels :

1. La variabilité de l'ensemble des composantes des SSER sahéliens est inhérente et structurelle.
 - a. Le risque est structurel : Les pluies sont très variables d'un lieu à l'autre, au cours d'une année et entre les années. Des périodes de sécheresse (1970-2000) sont suivies de périodes plus humides (1940-1970 ; 2000-2020) (Dardel et al. 2014 ; Descroix, 2018), permettant un « reverdissement » relatif du Sahel depuis une quinzaine d'années. Certes, il est relatif, variable et plus ou moins avéré (Dardel, 2014 ; Descroix, 2018 ; Kergoat L. Proposition de Projet ANR SWIMS 2020 ; C. Pierre Proposition de Projet AMI PRATICLIM).
 - b. les paysans gèrent ce risque depuis toujours : ils s'échangent des parcelles pour gérer ce risque (Loireau-Delabre, 1998 ; Minet, 2007). Les pratiques agricoles s'adaptent à la variabilité des cycles agricoles (on sème jusqu'à 6 ou 8 fois sur la même parcelle) (Saqalli, 2008). La gestion de l'élevage fluctue et s'est modifié, tant pour l'élevage « de case » que le transhumant. Les familles elles-mêmes se modifient, dispersant leurs membres selon les activités les plus opportunes mais voyant également leur structure changer (Gueye, 1989 ; Hammel, 2000 ; Requier-Desjardins, 2000 ; Thébaud & Batterbury, 2001 ; Hiernaux & Turner, 2002 ; Hein, 2006 ; Boutrais, 2007 ; Leclercq & Sy, 2011 ; Hiernaux et al. 2016)...
 - c. Bref tout change et tout le temps : Rares sont les structures biophysiques, environnementales, sociales et anthropologiques qui ne changent pas régulièrement et/ou ne se sont pas transformés au cours du siècle 1920-2020 qui vient de s'écouler. Intégrer cette variabilité comme une structure pérenne dans la compréhension de ce vaste sous-continent n'est ni déjà fait et évident, même si elle est réclamée depuis bientôt cinquante ans, ni partagée entre toutes les disciplines.
2. Cependant, il se passe des choses tellement massives qu'elles pourraient impliquer une succession de franchissement de seuils des SSER :
 - a. L'effondrement des grands empires et le moyen âge africain qui suivit, pour reprendre l'expression de Ki-Zerbo, puis l'instabilité politique des 18^{ème} et 19^{ème} siècles, y compris les appels des leaders Foulanis, du Fouta Toro au Sokoto et les raids, avait fortement réduit l'empreinte humaine. La conquête européenne du début du 20^{ème} siècle a entraîné une série de famines, épizooties et massacres qui avaient fortement affecté la population (Gado, 1993).
 - b. La *pax francia* qui a suivi a permis à la population de partir à la reconquête de son propre espace potentiellement cultivable, en étendant les champs et d'abord en créant de nouveaux villages. Les corvées obligatoires, les nouvelles taxes et le service militaire ont aussi contribué à cet éparpillement. Neuf villages sur dix au Niger ont ainsi moins de 150 ans (Raynaut et al. 1997). Ce premier seuil d'occupation politique a ainsi été acquis avec un système agraire évoluant pendant cette première moitié de siècle vers un mode rapidement extensif de défrichage généralisé, avec généralisation de la pluriactivité agriculture/élevage (Jouve, 2004).
 - c. Les quarante années suivantes, la croissance démographique aidant, ont fait accélérer cette conquête. Le nombre de nouveaux villages se ralentit mais il s'agit alors de "remplir les trous" entre les villages et les campements des semi-nomades : en 1950 environ 10% seulement des surfaces de la zone pluviale étaient cultivées pour 70% à 100% en 2000. Le deuxième seuil qu'est cette extension de l'ager semble arriver à son terme, avec une saturation progressive de l'espace, visible par la quasi-disparition des jachères pluriannuelles (Banoïn & Guenguant, 1999) et l'affaiblissement de la grande transhumance (Augusseau et al. 2006). La généralisation de la migration saisonnière participe également de ce phénomène. Le Sahel agricole est plein mais pas saturé : plus on va vers le Nord pour le Niger et vers le Nord-est pour le Sénégal et vers les zones d'occupation historique moindre, plus on trouvera encore des zones de culture avec jachère (dans des zones de pluviométrie moindre, aux moins bons sols, etc.). L'ampleur de cette conquête est variable selon les régions du Niger avec très grossièrement des

⁸ Ne dit-on pas en haoussa pour cette activité « Ciin Rani » : « manger la saison sèche », i.e. l'occuper au mieux.

polarisations : Le Niger se polarise autour des noyaux Zarma, orienté économiquement vers l'ensemble Ghana-Côte d'Ivoire-Bénin et Haoussa, plus puissant et relié à un ensemble plus puissant encore. Le Sénégal est plus contrasté avec un effet polarisant de Dakar et du sud. Pour nos terrains spécifiques, la région de Maradi est entièrement cultivée depuis les années 90 lorsque le Fakara l'était à 80 à 90% en 2005. Le Ferlo ne l'est qu'à peine, du fait de sa pluviométrie faible et la profondeur de ses nappes. Suivant en cela le raisonnement d'E. Boserup et du Dryland Research Institute sur ce même territoire (Boserup, 1965 ; Tiffen, 1999 ; 2001 ; 2003a, 2003b, Bouzou, 2000 ; Mortimore et al. 2001 ; Mahamane, 2001 ; Boubacar, 2004 ; Demont et al. 2004), un troisième seuil est perceptible pour les zones denses.

- d. En effet, ce moteur qu'est la croissance démographique sahéenne, somme toute explosive, n'entame que lentement sa transition : la population rurale, massivement dépendante de l'agriculture vivrière atteint au Sénégal 52% de la population (Données Banque Mondiale) et 83% au Niger (Données Banque Mondiale). Avec 5.5 enfants par femme en zone rurale sénégalaise (4.4 pour l'ensemble du pays) et 6.3 à 7.2 enfants selon les sources par femme pour l'ensemble du Niger (mais jusqu'à 8.5 enfants par femme dans l'état du Jigawa au Nigeria, record mondial), le Sahel subit un choc démographique et environnemental sans précédent. Les familles se modifient depuis longtemps vers le modèle mononucléaire (McDowell, 1966; Goddard, 1973; Conte, 1979; Grégoire, 1986; Barry, 2000; Saqalli, 2008), les pratiques d'héritage et de redistribution des pouvoirs se redéfinissent (Starns, 1974 ;Ega, 1983; Saqalli, 2008; Ngana et al. 2009; Saqalli et al. 2010; Sougnabé et al. 2009). Avec les flux commerciaux et de migration saisonnière mais aussi la mise en place effective des états (net au Sénégal, moindre au Niger : d'autres pays sahéens suivent des chemins très différenciés), ces changements augurent d'un Sahel nouveau.

Dès lors se construit la question cruciale : pour différentes dynamiques, sommes-nous dans une variabilité très mouvante ou dans un basculement ? Les cris au loup de la famine généralisée puis de l'effondrement politique par la bombe démographique puis de la désertification ont fait questionner un malthusianisme centralisateur et élitiste, sous-estimant la résilience actuelle remarquable du monde sahéen, en tout cas pour l'instant. Inversement, la peur de la disparition de tout tampon environnemental par habitant, social par les réseaux familiaux est loin d'être injustifiée. Ici apparaît la pertinence de notre approche : ces dynamiques complexes et puissantes, chacune déterminante, sont souvent décrites qualitativement, éventuellement quantitativement pour peu et rarement relativement les unes aux autres, s'appliquant indifféremment sur l'ensemble du Sahel. Rendre le poids à ces dynamiques, les formaliser qualitativement puis quantitativement, et les replacer les unes aux autres, différemment dans l'histoire (en particulier longue), différemment selon les lieux, en montrer l'intrication et par là rendre compte des trajectoires différentes que suivent et pourront suivre différents sahéens, donne son sens à notre démarche. Cette approche méthodologique, présentée globalement dans les sections précédentes, s'est traduit par (i) une étape de diagnostic territorial, (ii) une compréhension des dynamiques sociales et familiales agissant sur le SSER, (iii) une reconstitution formelle par modélisation spatialisée multiagent des SSERs sahéen en conséquence pour en tester la variabilité et la robustesse. Deux territoires sont ici abordés, chacun constituant deux étapes bien différenciées dans ce parcours de recherche :

- Le Sahel Nigérien et plus précisément trois territoires historiques (Fakara, Maradi, Damagaram, tous ensemble un territoire d'environ 60 000 km²) a été l'objet de mon doctorat, durant lequel ce processus de recherche a été élaboré et réalisé. Cette bande méridionale large de 300 km se répartit en une partie nord, de climat saharo-sahélien, où l'agriculture pluviale est très aléatoire et où l'élevage transhumant et/ou nomade est dominant, et une partie sud d'agriculture pluviale, de climat soudano-sahélien et où se concentre 90% de la population. 85 % de cette population vit en milieu rural et est considéré comme vivant des activités agricoles au sens large (agriculture, horticulture, arboriculture, élevage, prélèvements de bois et de produits forestiers non ligneux) mais aussi du commerce et de la migration saisonnière.
- Le Ferlo Sénégalais, territoire de taille équivalente, est la nouvelle entrée par laquelle je peux de nouveau faire de la recherche en Afrique de l'Ouest, les conditions de sécurité rendant inaccessible une grande partie de cet espace politique, entrée géographique mais aussi institutionnelle par mon intégration au sein du projet ERC RISE INSA sur les flux d'azote en Afrique de l'Ouest et, éventuellement, du projet ANR SWIMS. Si le premier territoire est composé de lieux de vieille occupation (16^{ème} siècle pour le Fakara, 18^{ème} pour le Damagaram, 19^{ème} pour Maradi), le Ferlo est un vieux refuge des réprouvés des différents royaumes du

fleuve et du Djolof puis de l'occupation française puis de l'état sénégalais. Elle est désormais le lieu d'une colonisation progressive et d'une implantation de l'État.

Sur ces bases, Raynaut et al. (1997) dans « Sahels » avait montré la diversité des usages des territoires à l'échelle de la bande soudano-sahélienne, produit d'une combinaison de l'effet des histoires différentes et des variations biophysiques. L'approche ZADA (voir §4.2) est l'entrée privilégiée pour faire apparaître cette diversité du territoire, telle que perçue et par conséquent, telle qu'utilisée par les habitants, et ce, à une échelle régionale, celle des « pays » locaux et plus celle des états. Ainsi, les missions ZADA réalisées au Niger en 2004-2005 font apparaître les zonalités des usages, produits des variables biophysiques (présence d'eau de surface ou souterraine, de sels, de sols indurés ou trop sableux, de vallées, d'aboutissements de couloirs de transhumance eux-mêmes configurés pour relier les zones d'élevage, de parcours, de commerce et d'exports, etc. (Figure 3).

Ainsi, a été décrit pour la première fois dans la littérature le facteur structurel expliquant l'organisation ethnique sur la vallée du Dallol Bosso, avec les Zarma sur les bords de la vallée et les Foulanis au centre : la vallée collecte les eaux sur les bords de la vallée sèche et l'eau de la nappe phréatique est ainsi douce, propice au maraîchage. Au centre, l'eau de la nappe est salée, ayant collecté sur 1000km les eaux de l'Azawad, est utile pour les « cures salées » du bétail (Figure 3 Fakara). De même, la carte des couloirs de transhumance fut ainsi la première obtenue sur la zone de Zinder et montra la structure en parapluie inversé de collecte du bétail centrée sur la ville de Zinder, à destination de l'immense marché du Nigeria (Figure 3 Damagaram).

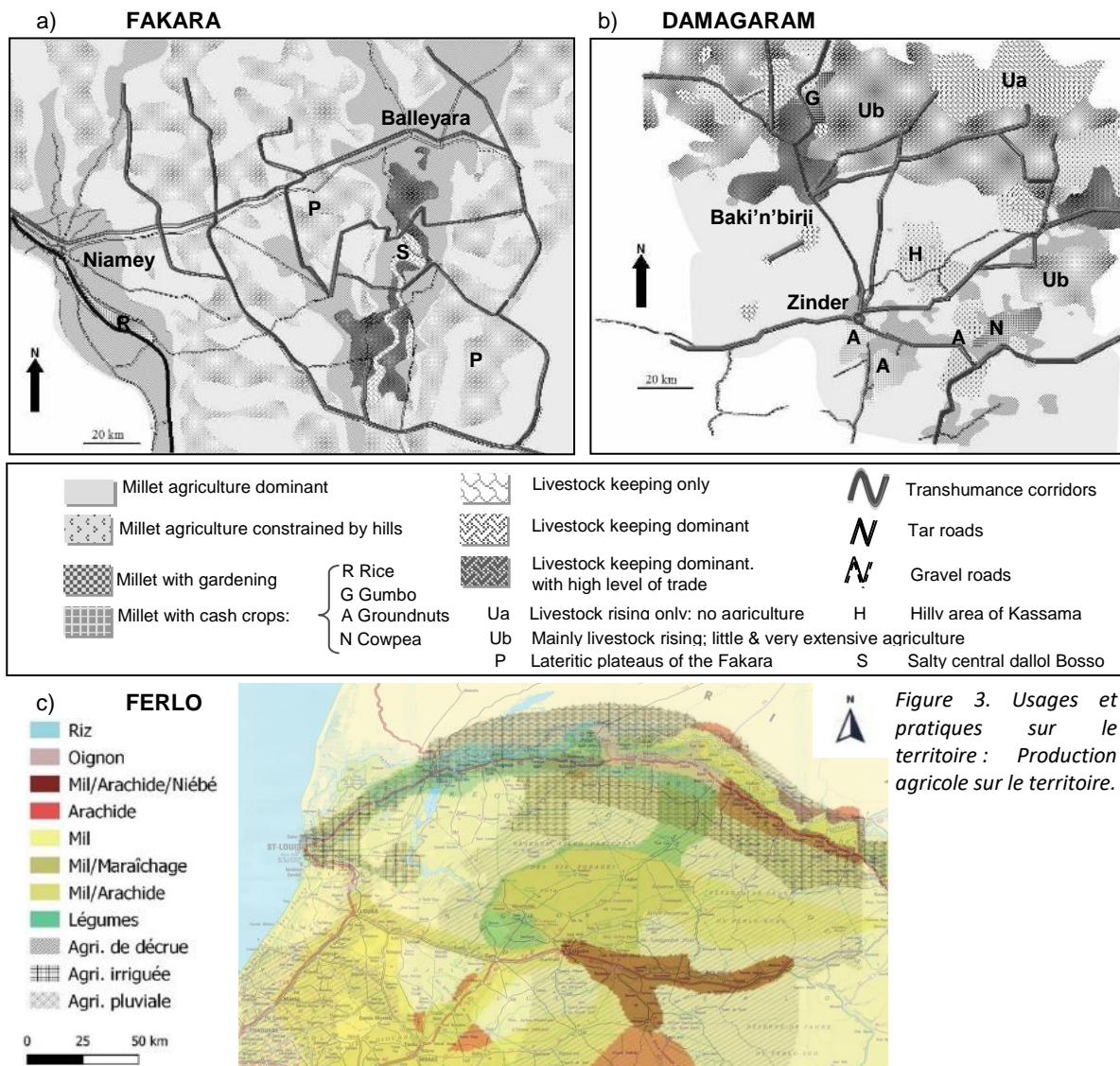


Figure 3. Usages et pratiques sur le territoire : Production agricole sur le territoire.

La dichotomie entre le *Walo* écologique, la vallée du fleuve Sénégal et le *Jeeri*, terme qui désigne l'envers du *Walo* i.e. un espace non irrigable, est incontournable. Elle s'est traduit en termes politiques avec le même terme

de Waalo pour désigner l'ancien royaume (1287-1855), le *Jeeri* d'usage, qui désigne les espaces pâturables et appropriés en terme foncier par des familles du *Waalo* et le *Kooya*, ou *Ferlo* sans droit. Ainsi, pour reprendre notre article soumis à la revue *Vertigo*, le territoire maintenant appelé Ferlo et son pourtour sont nommés partout doublement selon sa nature biophysique et institutionnelle, chacune se confondant mais seulement partiellement : cela rappelle à l'ordre quant à la nécessité de prendre en compte la profondeur historique, reliant pays d'eau et pays sans eau, pays agricole autour du fleuve et pendant pastoral sur sa bordure méridionale, no man's land refuge et royaumes historiques. Ainsi, si le Niger récupère son espace historiquement abandonné de force, le Sénégal pousse sur un espace historiquement non inclus y compris de jure (Figure 3 Ferlo).

Cette adéquation entre territoire biophysique, paysage et « pays » (au sens de territoire partagé en commun, dans lesquels s'insèrent des terroirs, espace local de vie d'une unité collective, par défaut le village) n'est pas nouvelle et a même eu historiquement une telle force d'explication pour décrire les caractéristiques et différences dans des systèmes agraires vus autrefois comme ancestraux, qu'ils ont favorisé une certaine vision déterministe sur leur évolution et leur devenir. Le focus sur les paramètres biophysiques (fumure du sol, pluviométrie, NDVI ...) fut tel que la variable mobilisant toutes les autres dans ce SSER sahélien, à savoir la force de travail et la capacité sociale à la mobiliser, n'a jamais reçu la même sollicitude. Ici se positionne un de mes projets à savoir construire une cartographie de la disponibilité en main d'œuvre rurale qui reste à faire. Le ZADA permet cependant de recenser au-delà des facteurs structureaux : il est aussi un détecteur de signaux faibles, qu'il s'agit de démêler d'entre différents signaux pour identifier les potentielles alertes et tendances futures. A cette date, l'on ne peut affirmer que ces signaux faibles d'alerte ont une valeur scientifique et prospective. Cependant, ils constituent autant de voies de recherche futures pour étayer leurs valeurs. Deux exemples sont ici présentés :

A. La cartographie ZADA sur le Damagaram, région historique correspondant à l'ancien sultanat du même nom et ayant la ville de Zinder (900km de Niamey) pour capitale, avait été l'occasion d'une collaboration avec l'ONG Aquadev, partenaire du même projet DGCD PAD. L'enquête menée conjointement avait permis d'identifier la couverture sanitaire réelle sur base des dispensaires réellement fonctionnels⁹ sur les deux zones (Figure 4).

1. La polarisation des infrastructures sanitaires autour de Niamey laissait un creux de couverture sanitaire dans l'anneau 40-80km comprenant le Fakara : Trop près de la capitale pour avoir son dispensaire, trop loin pour y accéder (Figure 4a)...

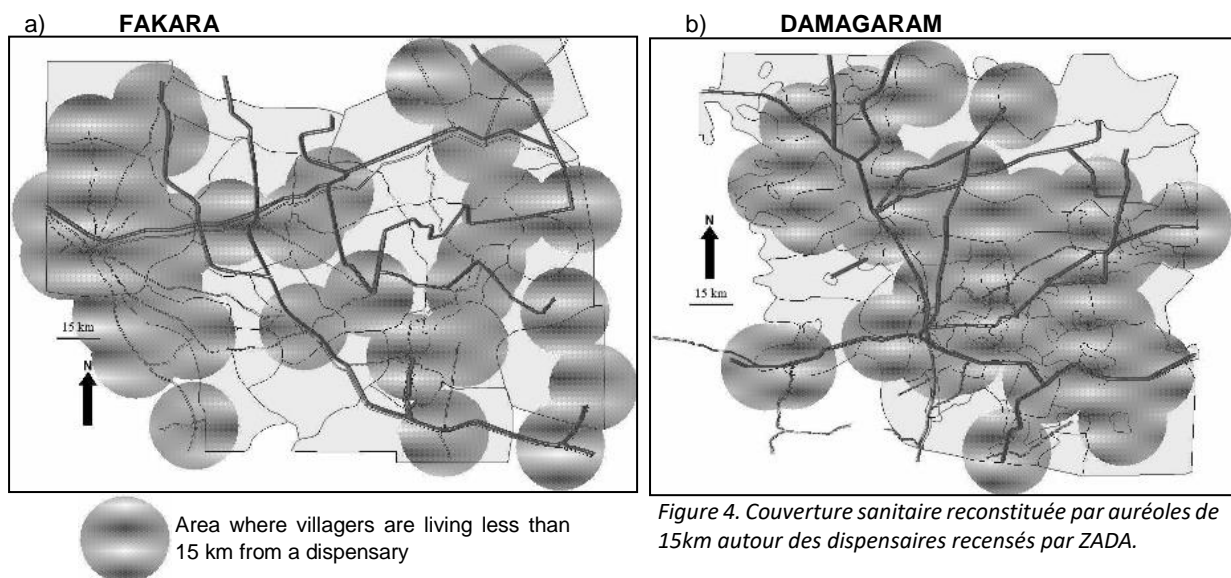


Figure 4. Couverture sanitaire reconstituée par auréoles de 15km autour des dispensaires recensés par ZADA.

2. Sur le terrain de Zinder dans l'ancien sultanat du Damagaram (Figure 4b), une zone centrale à l'Est et à proximité de Zinder, est identifiée : par le ZADA, elle est décrite comme rocheuse, collinaire et par

⁹ Certains dispensaires présents selon le ministère ne fonctionnaient pas (les infirmières sont rarement volontaires pour ces lieux reculés), certains dispensaires tenus par des ONGs, en particulier évangélistes, ne s'identifiaient pas.

conséquent à l'eau souterraine très profonde. Il faut une demi-journée aux mères pour aller chercher de l'eau, à pied dans les rares puits (tous les hameaux n'ont pas de puits). A cela se rajoutait une combinaison subtile : plus on va vers le nord, plus la pluviométrie est faible mais plus les champs sont grands. Plus on va vers le sud, plus il pleut et plus les champs sont petits. Seulement les deux dynamiques n'ont pas les mêmes gradients et il s'avérait que cette zone centrale avait des champs moyens pour des rendements déjà assez médiocres : par famille, la production était finalement la plus faible. Or, une cartographie indépendante de mesures des tours de poignets des enfants, mesure commune de la sous-nutrition (Garenne & Cantrelle, 2020 ; <https://www.nutritionintl.org> comme un exemple de ce type de campagne) montrait un taux de dénutrition important de cette zone centrale sans l'expliquer. Ainsi, identifier cette corrélation laissa la possibilité d'explorer des pistes plus solides, à savoir, payer pour des puits profonds et soutenir des actions d'amendements organiques (légumineuses et fumures).

B. Cette même démarche réalisée au Sénégal laisse apparaître des signaux faibles équivalents que je souhaiterais faire confirmer (Figure 5 Fakara)¹⁰. On notera trois signaux d'alerte :

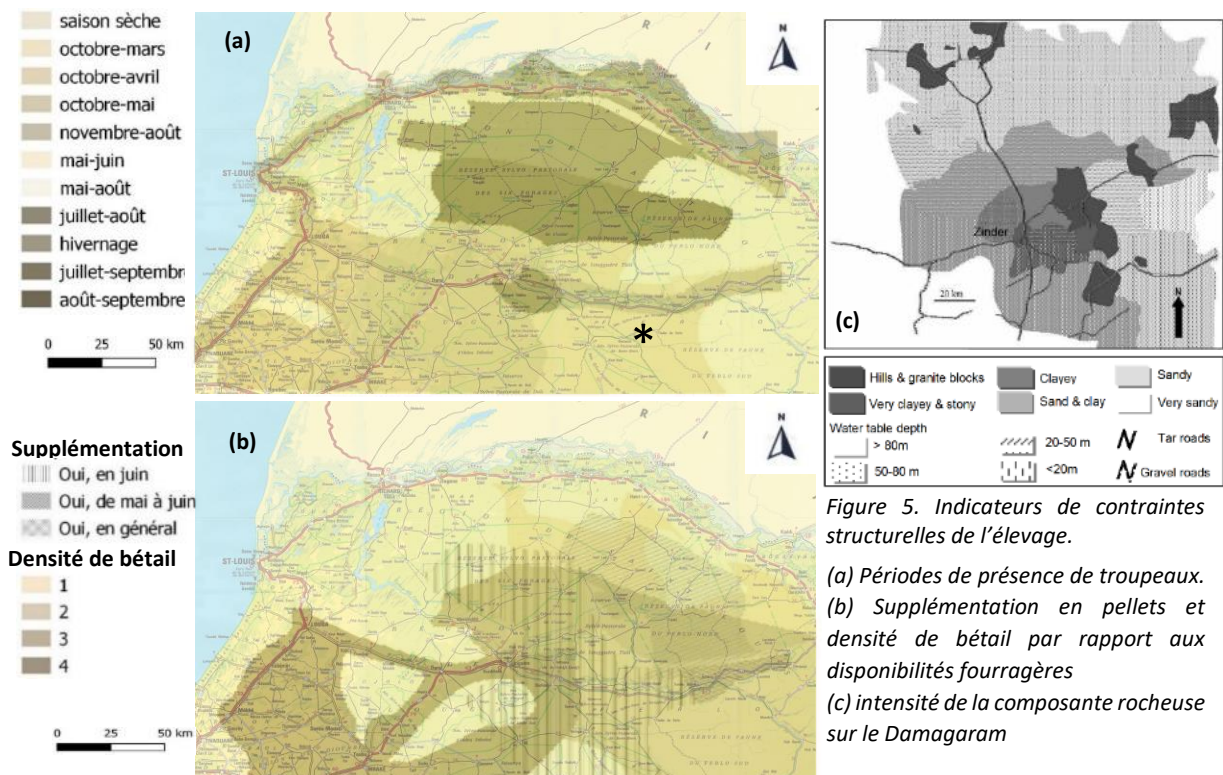


Figure 5. Indicateurs de contraintes structurelles de l'élevage.

(a) Périodes de présence de troupeaux.
 (b) Supplémentation en pellets et densité de bétail par rapport aux disponibilités fourragères
 (c) intensité de la composante rocheuse sur le Damagaram

1. Le fait que plusieurs interviewés aient décrit la période de présence des éleveurs transhumants dans le Ferlo, celle qui définit leurs identités d'éleveurs, comme étant assez courtes. Non seulement la période de transhumance apparaît courte au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans le Ferlo, historiquement sans puits possible, mais il semblerait que cette période devienne de plus en plus courte. Surtout, elle est d'autant plus courte que les troupeaux familiaux des personnes interviewées sont petits, en gros, que les familles sont pauvres.
2. La variable supplémentation de l'élevage par les pellets, si elle semble avoir toujours été présente, semble se généraliser selon les enquêtes recueillies : on supplémente plus dans les zones d'élevage transhumant, et on supplémente de plus en plus.
3. Enfin, le maintien sur presque toute l'année de certains troupeaux dans ce nouvel espace de vie pastoral au sud (* sur la Figure 5a) souligne une dérive vers le sud des élevages comme attestée par Boutrais au Niger (2007). Cette « diffraction » des trajectoires des éleveurs selon des seuils de taille des troupeaux et des familles a été décrite auparavant pour les élevages d'Afrique du Nord par Bourbouze (2002), se

¹⁰ Dépôt du projet TESSENS : Temps Effectif Séjour et Supplémentation Elevage au Nord Sénégal avec Amadou Hamath Diallo

différenciant en hyper-nomades motorisés et petits transhumants locaux. Je fais l'hypothèse de dynamiques équivalentes sur le Ferlo à vérifier selon une théorie de diffusion-accrétion que je souhaiterais développer comme perspective de recherche dans le futur.

Ainsi, au-delà de l'apport en termes de connaissance empirique sur un territoire, d'identification des perceptions et de rationalités à l'échelle régionale, de recensement des variables et des enjeux sur un territoire, l'outil peut servir de détecteur d'enjeux à signal faible, pour pouvoir identifier des pistes sur base d'indices limités. Ce dernier point reste à justifier au cours de mes travaux de recherche futurs.

3.2.2 Dynamiques familiales et sociales à large impact : approche MASSE

Reconstitution historique de l'évolution des familles et impact pratique

Le modèle construit, SIMSAHEL, reproduit spatialement l'évolution de terroirs (figure 9) et les populations qui y vivent et croissent. Un agent est un individu, un pixel correspond à 1 hectare et le pas de temps est d'une semaine, durée de la moins longue opération agricole pour un hectare à savoir le semis. La plate-forme utilisée est CORMAS élaborée par le CIRAD (Common-Pool Resources Multi-Agent Systems : <http://cormas.cirad.fr/indexeng.htm>). La simulation commence vers 1930 pour s'achever 100 ans plus tard donc avec 25 ans de prospective à la date de son élaboration. Chaque agent naît, grandit, se marie, fait des enfants et meurt. Il/elle reste imbriqué dans des hiérarchies de dépendance et d'obligation selon son sexe, son âge, son lignage et son rang dans la famille, conditionnant son accès différentiels aux ressources environnementales et humaines. Ici apparaît le résultat finalement le plus net de ma démarche d'intégration pondérée du socio-anthropologique :

- Durant mon doctorat, la longue phase de terrain (2 ans en villages dont 1 an dans un seul terroir) dont on présente seulement les résultats spatiaux dans la section précédente, et l'imprégnation socio-anthropologique qui l'accompagne, ont permis une compréhension fine des jeux intrafamiliaux (domination et hiérarchie, dépendance, tensions, entraide, commensalisme, promesses, engagements et accords, héritages et redistributions, etc.) et interfamiliaux (dépendances, hiérarchies lignagères, accès aux terres, etc.), des lignes des fracture et de pouvoir.
- Combinés aux aspects quantitatifs¹¹ et à une reconstitution des histoires locales, je disposais de règles suffisamment étoffées pour décrire un agent type, l'individu et ses interactions avec sa famille selon son sexe, son rang familial, sa position selon les rangs des mères puis les familles et leur rang lignager, les différentiels d'accès à la terre et aux autres ressources (Figure 6). Ce processus itératif de recherche a gagné à se faire in situ¹².

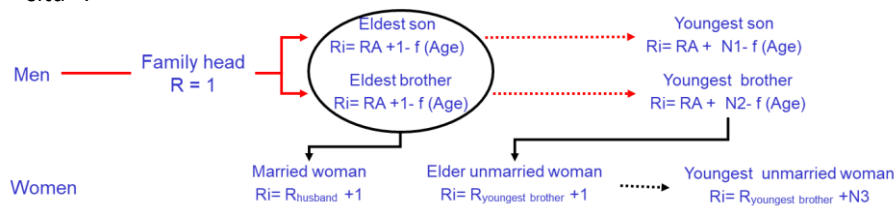


Figure 6. Programmation des rangs dans les familles pour les hommes et garçons, pour les femmes et filles.

¹¹ Analyse des systèmes de production agricoles, des activités économiques comme l'élevage de bétail, la migration saisonnière, les commerces, dynamiques historiques, coûts, risques et prix divers, démographies, etc.

¹² Ainsi, une anecdote illustre cette itération en direct : mon modèle informatique n'intégrait alors pas deux points : la transhumance qui n'était pas implémentée, et la commensalité, plus précisément la hiérarchie sociale quant à l'accès à la nourriture qui était alors programmée comme établie au hasard. Les simulations tuaient tout le monde :

- Sans transhumance, la végétation modélisée disparaissait très rapidement, tondue et dévorée par les différents ruminants présents. Seule la mise en place de cette transhumance sauvait la végétation locale ce qui démontrait ab absurdo la pertinence de cette pratique.
- Certaines familles s'effondraient rapidement, en particulier celles avec beaucoup de jeunes enfants et peu d'adultes.

Je partis le jour même de ce constat dans le village où je séjournais habituellement jusqu'à avoir compris qui et pourquoi se lançait le début de la transhumance et comment se faisait sa fin mais aussi pour vivre et observer dans une bonne dizaine de familles la commensalité des repas quotidiens (tout en analysant leur système d'activité) et les dires des membres des familles

De même les mariages se font sur base assortatif (White, 1999), sur base d'appariement à enchère descendante. Le rythme annuel des activités économiques et sociales a pu ainsi être reconstitué comme l'expansion en terres des familles. Cette expansion est différente selon les familles par la combinaison des différences de main d'œuvre familiale, de lignages, du type de familles et du mode d'héritage reconstituant ainsi l'hétérogénéité des propriétés foncières familiales. Ces propriétés grandissent, se scindent éventuellement par héritage, reconstituant ainsi également l'expansion des surfaces agricoles autour de villages. On peut ainsi simuler l'histoire de cette colonisation de l'œkoumène national. De plus, j'ai pu montrer l'importance de la migration saisonnière comme tampon aux aléas agricoles, surtout pour les familles pauvres, pour encaisser la soudure alimentaire, période de difficulté entre avril, pic de la saison sèche, et la récolte de septembre. Reconstituer l'ampleur d'une histoire finalement très récente et la très grande mobilité des villageois permet ainsi de contester l'image du « paysan africain immobile » (Boyer & Mounkaïla, 2010).

En particulier, l'image d'Epinal de la grande famille élargie, composée de plusieurs ménages accolés (ménages des fils ou ménages des femmes) sous la férule du patriarce, certes attestée dans les recensements de l'entre-deux-guerres, était rare dans tous les villages étudiés (entre 2/3 et plus souvent 85 à 90% des familles sont mononucléaires).

Un résultat majeur montre l'adéquation des régimes de croissance des deux types de famille (Figure 7) et permet de faire l'hypothèse que cette transition familiale de la famille élargie à la famille mononucléaire a bien eu lieu dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. On peut ainsi voir notre démarche « validée » en comparant les taux de croissance annuels des surfaces cultivées selon les deux types de famille et à différentes périodes, simulées, et ces taux reconstitués à partir des quelques images aériennes disponibles pour les années 50 à 60 (t0= 1950), obtenu des travaux de M. Loireau-Delabre (1998). La famille élargie correspond mieux aux croissances observées pour la première période et la famille mononucléaire correspond mieux pour la seconde période (les taux d'erreur sont masqués pour une meilleure lisibilité) (Figure 7). Or, nos simulations ont été faites avec des séries temporelles climatiques randomisées, sans faire apparaître les mêmes correspondances de crises climatiques. Ainsi, ce changement de types de familles aurait eu lieu dans tous les cas et les grandes sécheresses et famines des années 70 n'ont servi au mieux que de catalyseur.

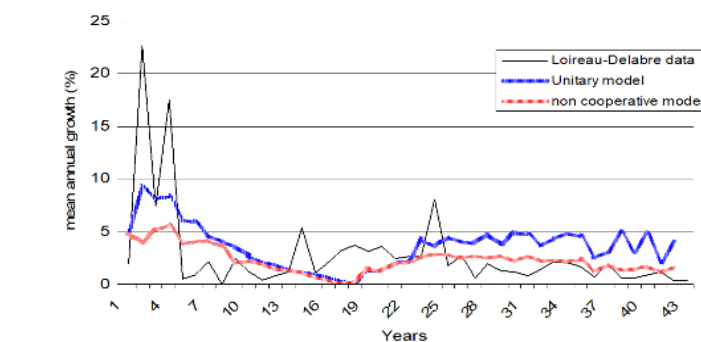


Figure 7. Reconstitution de la croissance annuelle des surfaces cultivées et comparaison avec les reconstitutions par interpolation d'images aériennes

Mean annual cropland growth rate

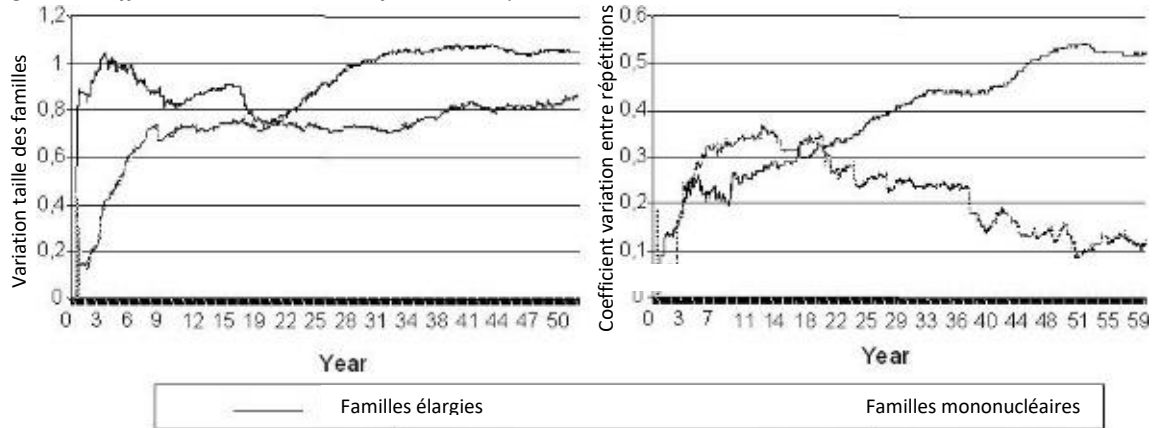
	L-D data	Non cooperative Family	Unitary Family
All years	2,22% per year	2,32% per year	3,68 % per year
First period (1950-1972)	3,91% per year	2,45 % per year	3,35 % per year
Second period (1973-1993)	1,65% per year	2,18% per year	4,03 % per year

à ce propos lors de moments difficiles, soit le tout sur 1.5 mois. Les pratiques observées sont ainsi à la base des règles en mise en place des transhumances et de la commensalité du modèle SIMSAHEL.

¹³ Ce schéma se comprend comme suit : les chefs de famille ont toujours le rang 1, le plus faible donc le meilleur. Tous les autres déclinent leur position intrafamiliale comme une distance à ce chef de famille, homme ou femme. Ainsi, le fils aîné de ce chef aura un rang de plus soit 2, mais cela sera également le cas du frère cadet du chef de famille. Une fonction liée à l'âge les différenciera. Pour chacun d'eux, la lignée mâle sera poursuivie, donnant un point de plus pour chaque cadet. Les femmes mariées dans cette société patrilocale sont les épouses et ont le rang de leur mari +1 donc plus faible. Les femmes non mariées sont les sœurs et ont un rang inférieur, l'aînée ayant le rang du benjamin +1 donc plus faible.

Mais Le modèle SIMSAHEL a fait apparaître que cette famille élargie s'avérait beaucoup moins robuste aux chocs environnementaux (toutes choses égales par ailleurs) que la famille mononucléaire (Figure 8). Les familles élargies s'étendent certes plus vite, mobilisant plus et plus facilement de la main d'œuvre. Mais, face à une série de chocs, (des épisodes de sécheresse, conjoncturels) qui réduiraient le grenier familial, le tampon de secours alimentaire et surtout la progressive saturation de l'espace, la plus grande croissance des familles élargies, rarement contrainte par la disponibilité en main d'œuvre, fait qu'elles ont paradoxalement un ratio de ressources par membre rapidement plus faible.

Figure 8. Coefficients de variation entre familles et répétitions



Droite: moyenne des coefficients de variation entre les tailles des familles (moyenne des simulations) ; gauche : moyenne des coefficients de variation des tailles de familles entre les simulations (moyenne entre les familles)

On comprend alors la dynamique en jeu : la différence de robustesse, en lien avec la croissance démographique elle-même plus forte pour les familles élargies, a fait basculer les familles élargies : au décès du chef de famille, ces familles ont l'une après l'autre éclaté en familles mononucléaires.

Ainsi, la formalisation combinée des dynamiques environnementales et socio-anthropologiques permet de reconstituer non seulement la dynamique historique globale passée mais aussi les différences individuelles et familiales : c'est ainsi rendre compte d'un paysage non plus par gros pinceaux mais par touches individuelles. Dès lors, on peut envisager l'exploration du futur de ces individus, familles et territoires.

Prospective à court terme et dynamiques familiales

Dynamiques spatiales et économiques

En poursuivant le scénario business as usual, on obtient la figure 9.

La simulation des tensions, par le jeu des tensions intrafamiliales, crée très vite une série de fondations de hameaux. Les 40 premières années, malgré une croissance démographique forte, n'induisent pas une emprise

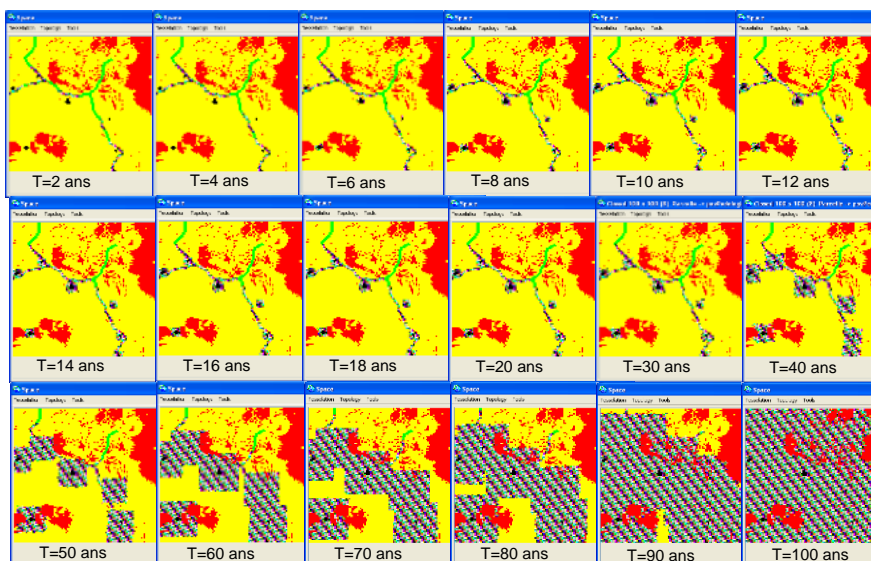
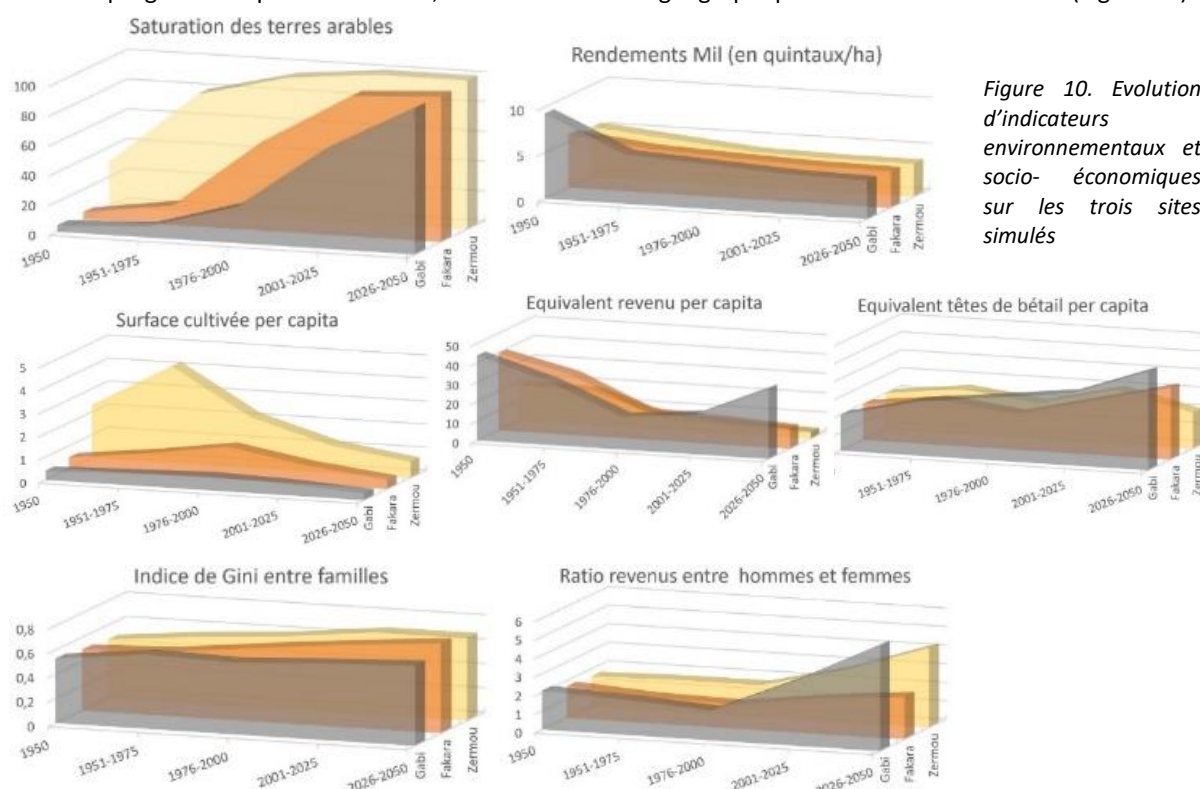


Figure 9. Reconstitution de l'occupation en surfaces cultivées sur Dantiandou (Fakara, Niger) de t=0 : 1930 à t=100 : 2030.

Rouge : plateaux
Jaune : plaine
Vert : vallée du kori
Autres couleurs : chacune attribuée à une famille / un lignage

massive du territoire. Les terroirs des années 60 apparaissent alors encore peu occupés. La démographie, cependant, s'impose et malgré la transition familiale décrite plus haut qui ralentit quelque peu l'expansion des surfaces, celles-ci, voient leur expansion se poursuivre inexorablement. La simulation, réalisée en 2007, est donc une prospective « business as usual » pour les trois dernières illustrations : le territoire est quasi entièrement occupé dès 2020-2030 sur le Fakara, ce qui est avéré aujourd'hui (Dardel et al. 2014 ; Hiernaux et al. 2016 ; Nazoumou et al. 2016 ; Descroix, 2018).

Mais au-delà de cette reconstitution spatiale que peut également réaliser un automate cellulaire simple, le modèle SMA simule des dynamiques sociales, dont les évolutions spatiales ne sont qu'un aperçu, progressives, cohérentes entre elles et somme toutes, rarement spectaculaires si le modèle correspond et mime bien la réalité: il n'y a pas un facteur seul changeant massivement et expliquant toutes les dynamiques observées mais un faisceau de divergences progressives, cohérentes entre elles et brossant des situations initialement peu contrastées. Ainsi, les simulations sur les trois sites, de Zermou le plus sec à Gabi le plus humide montrent des évolutions progressives qui s'accumulent, montre tout l'écart géographique entre ces trois localités (Figure 10).



Sur les trois sites, la saturation des terres s'accompagne d'une diminution des disponibilités en terres par habitant et des rendements agricoles. Pour autant, la différenciation entre Niger pluvial en difficulté et Niger pluvial « utile », dont la trajectoire pourrait suivre une dynamique boserupienne, est ici visible (Boserup, 1965) (voir description en §3.2.1.) :

Gabi, le site le plus méridional, voit cette transition se faire où l'articulation agriculture-élevage-engrais-revenus extérieurs se combinent dans un cercle sinon vertueux du moins positif : l'équivalent revenu par habitant décolle comme le bétail, l'épargne principale. Le pays s'enrichit, la fertilité des sols se maintient. Cela n'empêche pas une augmentation des inégalités, entre hommes et femmes et entre familles. A contrario, le Fakara voit un lissage des inégalités hommes femmes, le maintien des inégalités entre familles, de la pauvreté et une augmentation de l'élevage. On peut envisager une évolution possible vers des systèmes basés sur les transferts des migrants et l'élevage. Enfin, Zermou, très rapidement saturé, voit également ses inégalités augmenter et sa population s'appauvrir, en richesse et en bétail.

Cette triple évolution simulée, par l'aspect non-caricatural des portraits de village qu'elle dresse, donne sa richesse à l'approche : la modélisation rétrospective, combinant rétrospective et prospective (Paegelow & Camacho-Olmedo, 2008 ; Paegelow et al. 2018), est ici affinée socialement avec des situations nuancées,

cependant compréhensibles. Reste à vérifier pour la décennie suivante la validité de ce scénario « business as usual » socio-environnemental pour les prochaines décennies 2020 et 2030.

Dynamiques socio-anthropologiques

A la vue des fortes et récurrentes tensions intrafamiliales observées sur le terrain en particulier lorsque cela concernait la répartition des revenus des diverses activités économiques et l'accès au foncier, j'avais intégré deux mécanismes reproduisant ces tensions qui devaient être différentes d'une famille à l'autre :

- La tension dite « AntiClan » augmentait au fur et à mesure que chaque membre d'une famille élargie voyait le revenu remis au chef de famille sans retour sur la fin de l'année : elle rend compte du sentiment « d'injustice » exprimé si souvent sur le terrain et l'envie de ne plus dépendre d'une structure familiale dominante. Passé un certain seuil, à la mort du chef de famille, cette famille éclate en familles mononucléaires. Inversement, des nouvelles familles mononucléaires pouvaient en croissant devenir élargies dès lors que les soutiens (douaires, aides au départ en migration, bétail...) s'avéraient conséquents et récurrents.
- La tension « foncière » : le processus simulant l'expansion foncière passe, lorsque les besoins alimentaires d'une famille augmentent, par le « tour » du chef de famille et autres adultes sur des terres en espérant en trouver certaines parcelles libres. Ainsi, l'occurrence de trouver des parcelles est proportionnelle à la main d'œuvre familiale adulte mais aussi à la disposition des terres déjà possédées : plus elles sont dispersées, plus les chances de trouver une terre non occupée, fertile et proche de la maison familiale augmentent. Ainsi, plus les familles sont anciennement installées, plus les parcelles sont anciennement présentes, possédées en nombre et dispersées. De plus, les familles élargies, avec beaucoup de terres et de main d'œuvre, s'étendent plus facilement. Mais avec le temps, il est de plus en plus difficile de trouver de nouvelles parcelles et la tension foncière au sein de chaque famille augmente, plus ou moins vite. Passé un certain seuil, les familles au système d'héritage coutumier (l'aîné comme seul héritier) basculent vers un système d'héritage dit « musulman local (égalité entre les frères pour les terres, pas de terres pour les sœurs ; 2 parts égales pour les frères, 1 part égale pour les sœurs). Inversement, des familles au système d'héritage musulman local rebasculent vers un système coutumier s'il n'y a pas eu de séparation des terres à la génération précédente ;

Ces deux dynamiques concomitantes créent une combinaison de familles possibles :

1. Familles élargies à héritage coutumier, le système d'origine ;
2. Familles élargies à héritage musulman local, si la tension foncière est allée plus vite que la tension anticlan ;
3. Familles mononucléaires à héritage coutumier, si la tension anticlan est allée plus vite que la tension foncière ;
4. Familles mononucléaires à héritage musulman local, où tension anticlan et tension foncière ont joué toutes deux ;

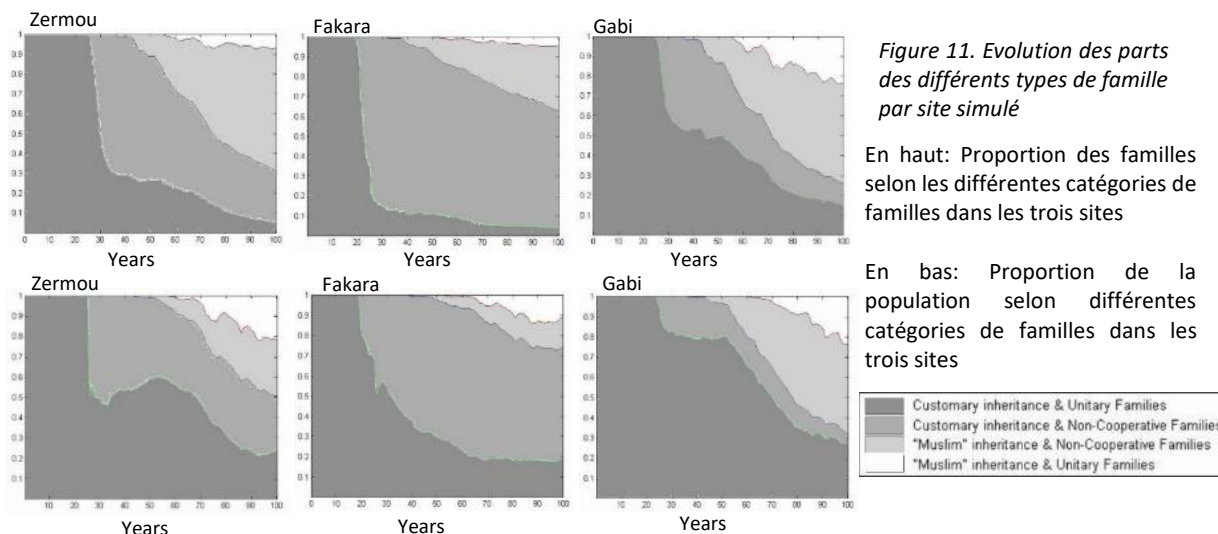
La figure 11 illustre cette double dynamique (proportion des familles et proportion des populations différent car les familles ont des tailles variables : les familles élargies ont bien plus de membres que les familles mononucléaires). On voit l'effet des tensions environnementales et économiques sur les familles :

- Zermou le site sec est en fin de simulation composé à moitié de familles mononucléaires à héritage coutumier et à héritage musulman local,
- le Fakara est composé en très grande majorité de familles mononucléaires à héritage coutumier et quelques familles élargies à héritage coutumier ;
- enfin, Gabi bascule plus nettement vers une société composée à moitié de familles à héritage musulman local et moitié coutumier, les premiers partagés entre mononucléaires et élargies et les derniers quasi exclusivement composés de familles élargies.

Le dernier type de familles n'était pas apparu en enquête. En termes de modélisation, il fonctionne quasi sans réseau d'entraide familial, voit sa fécondité baisser et ses revenus augmenter. Ce groupe ressemble assez nettement aux Alhazai, décrits par Grégoire (1986) à Maradi, mais existant maintenant dans toute la zone haoussa nigérienne, groupe récent plutôt rigoriste basant leur sécurité et leur vie sur le réinvestissement systématique de leurs activités économiques, sans compter sur un réseau familial ou de clientèle comme les autres commerçants et autres pluriactifs.

A l'instar de Pierre-Joseph Laurent travaillant sur les pentecôtistes évangélistes du Burkina Faso (Laurent, 2009), je fais une analogie avec la transition protestante que Weber décrit en 1905 (Weber, M. 1905. L'Éthique

protestante et l'esprit du capitalisme), où une modification religieuse, protestante évangéliste ou musulmane rigoriste permet de légitimer des trajectoires individuelles familiales mononucléaires et non plus seulement familiales au sens élargis du terme.



Ainsi, la démarche de modélisation itérée avec le terrain s'illustre ici : elle nourrit la recherche de terrain en dévoilant le poids de variables cruciales, elle combine des facteurs et produit des résultats non plus seulement caricaturaux mais nuancés qui amènent de nouvelles réflexions, ici par exemple sur le lien avec certaines dynamiques politiques et sociologiques.

3.2.3 Enjeux sociopolitiques des évolutions familiales : des modèles aux conséquences

La démarche MASSE dont l'acronyme et le détail seront présentés dans la suite de ce manuscrit mais dont la construction conceptuelle fut envisagée pendant ce travail de doctorat m'avait laissé en pratique de nombreuses interrogations et pistes de recherche à explorer. Elles portaient toutes de l'effet d'accumulation, autrement appelé en modélisation, l'émergence ou plus simplement l'effet « petites causes, grands effets ». Trois exemples sont donnés ici :

- *L'effet des migrations sur l'âge au mariage.* La FAO au Niger, partenaire du projet PAD (Aide à la Décision) dirigé par B. Gérard et achevé en 2007, était intéressée par cet aspect quali-quantitatif de la démarche sur un point particulier. Du fait de l'écart monétaire entre l'appui qu'apportait par l'agriculture le chef de famille, quasi exclusivement le père de famille, et ce qui pouvait être tiré des activités commerciales monétaires et en particulier la migration saisonnière, le douaire¹⁴ que devait donner le « fiancé » à la famille de la « fiancée » a considérablement augmenté et sa part monétaire est maintenant quasi-totale. C'est ainsi au jeune et non plus au père de le fournir. Or, cela ne peut s'acquérir que par la migration saisonnière. Les exigences d'entraide familiale font qu'une somme incomplète ne peut être accumulée que difficilement par le jeune sur plusieurs années (par exemple par le jeu de placements de bétail auprès de peuls, ce qui est toujours risqué) et il doit donc le plus souvent gagner la somme totale sur une seule campagne de migration. Cette exigence pratique et les difficultés pour gagner cette somme au Ghana ou au Nigeria, selon la région d'origine, (sans compter le risque de racket par les douanes diverses, bien réel) entraîne un retard au mariage. Le modèle SIMSAHEL donne une moyenne de 2.5 ans. Il serait intéressant d'étudier les effets de cette tendance car elle semble être actuellement la seule à même de réduire la très importante fécondité du pays ;
- *La migration saisonnière a une importance colossale en termes démographiques et économiques.* On peut estimer que de 30 à 80% des hommes en âge de travailler partent en migration, selon les régions (Reardon,

¹⁴ Le douaire est donné à la famille de la bru par la famille du fiancé ; la dot est donnée par la famille de la bru à la famille du fiancé. Il ne peut donc y avoir de coureur de dot au Niger.

1994) mais ces chiffres ont continué à augmenter (Boyer & Mounkaila, 2010). Les transferts financiers de ces "exodants" représentent des apports importants pour les familles restées sur place, de l'ordre de 8 à 150€/hab./an selon les études (Luxereau & Roussel, 1997 ; Loireau-Delabre, 1998 ; Tahirou, 2002 ; Mounkaila, 2003 ; Saqalli, 2006 ; Harragin, 2006). Ces valeurs datent d'il y a 15 à 20 ans et les valeurs ont augmenté, grâce à la facilité des transferts monétaires qu'ont amené les téléphones portables et l'interopérabilité des réseaux. En considérant ainsi avec actuellement 22 millions d'habitants, 55% des hommes adultes soit 2,5 à 3 millions de personnes, le montant ramené chaque année atteint près des 450 millions d'€ (300 milliards de FCFA) faisant de cet apport la deuxième source de richesse après l'uranium. Le contraste avec le peu de considération voire la détestation officielle de cette activité est à souligner. Il m'apparaît nécessaire de poursuivre cette recherche, avec l'appui d'acteurs de la recherche avec qui je suis en lien comme F. Boyer (IRD), l'OHM Tessékéré ou le projet RISE INSA.

- « *l'approvisionnement* » en jeunes volontaires du mouvement *Boko Haram*. Cette réflexion est l'objet de l'article soumis avec P. Sougnabé, S. Ferrant et F. Gangneron. J'y ai en effet proposé l'hypothèse selon laquelle les dynamiques d'héritage joueraient un rôle non négligeable dans le recrutement du mouvement considéré (Watts, 2013). Ce mouvement est majoritairement rural, anti-élites islamisées urbaines et essentiellement kanouri (Pérouse de Montclos, 2012 ; Olojo, 2016 ; Sougnabé & Hassan, 2017) et les zones de violence endémique correspondent bien à cette aire culturelle (Figure 12). Or, la zone kanouri au Nigeria comme au Niger, si les surfaces arables sont également entièrement mises en culture comme en zone haoussa (Greenberg, 1947 ; Goddard, 1973 Starns, 1974), n'a pas subi cette transition des modes d'héritage, du coutumier où seul l'aîné dispose de l'héritage foncier, vers le « musulman local » où il y a au moins égalité entre les frères (McDowell, 1964; 1966, Gavian & Fafchamps, 1996; Lockwood, 1997). Je fais dans cet article l'hypothèse que ces jeunes hommes sont majoritairement des cadets, privés de terre, et sans espoir d'installation ni en zone rurale où les terres sont toutes appropriées ni en ville où les perspectives d'emploi sont limitées¹⁵. Je propose ainsi la démarche suivante :
 - a. Etablir que l'hypothèse d'exclusion patrimoniale produit bien une exclusion de jeunes hommes cadets exclus importante au passage des années 2000, d'abord grossièrement par imagerie (Landsat, Spot et enfin Sentinel) la carte par décennie des modes d'héritage en détectant les changements de découpage des parcelles (Ferrant et al. 2017) puis par modélisation spatialisée ;
 - b. Tenter d'obtenir, via les réseaux diplomatiques de la coopération française des séries de données démographiques sur les membres de Boko Haram capturés et vérifier si la proportion de cadets est effectivement significativement plus élevée.
 - c. Poser des scénarios pour les 30 prochaines années (2050) combinant croissance démographique et changement sociétal (polygamie en chute ou en hausse ; divorce en chute ou en hausse ; opportunités pour les jeunes en ville en chute ou en hausse ; etc.) ;

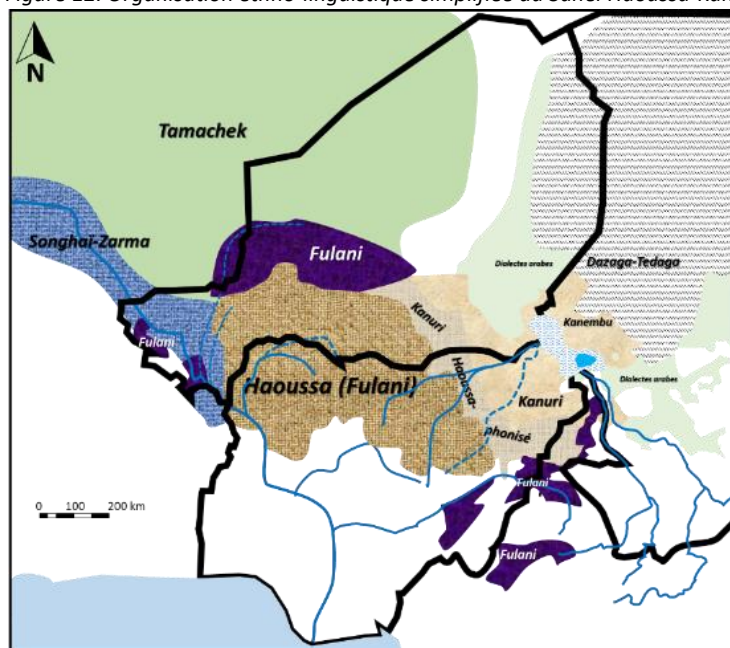
Toutes ces pistes sont des propositions envisagées pour des collaborations futures mais elles permettent d'entrevoir l'intérêt de la démarche proposée et les perspectives potentielles pour des collaborations à la fois avec différentes équipes de recherche de disciplines variées et avec des organisations internationales intéressées par ces approches. Ces pistes seront ainsi autant de perspectives de recherche par la suite. L'idée est de les réintégrer dans une démarche de formalisation plus large, à « décontextualiser » de l'ensemble sahélien pour obtenir une approche plus générique.

En effet, les circonstances politiques ont fait de cet espace relativement en paix jusqu'en 2007 une zone quasi entièrement rouge au sens du Ministère des Affaires Etrangères, entre les rebellions initialement touarègues (Azawad) puis fondamentalistes (AQMI) au Nord, reliquats de l'insurrection algérienne, de l'approvisionnement libyen et des mouvements salafistes du Moyen-Orient et au sud (instabilité malienne, difficulté de transition démocratique presque partout et insurrection de Boko Haram à l'Est). Cet espace est jeune et les forces en mouvement ont comme points communs cet affranchissement massif de la jeunesse qu'il serait crucial

¹⁵ Même si les migrants nigériens se contentent d'emplois informels : à noter que ces derniers, même haoussa, vont chercher ces emplois non pas dans la zone haoussaphone mais à Lagos et dans d'autres grandes villes du Sud du Nigeria.

d'investiguer. Mais les interdictions de terrain et de séjour m'ont imposé un retour au tout premier terrain que j'envisageais, les forêts équatoriales et tropicales.

Figure 12. Organisation ethno-linguistique simplifiée du Sahel Haoussa-Kanuri



[D'après Poncet, 1973 ; Ogo, 2005 ; Mutuzirkin, 2007 ; Ulamm, 2007 ; Saqalli, 2008 ; Blench, 2012]

Belem M., Olaniyi A. O., Barbier B., **Saqalli M.**, H. K. Mandé, Sawadogo P. Projection of West-African Cropland Dynamics under socioeconomic and Climate Scenarios. Futures. (soumis)

Saqalli M., Diallo Hamath A., Kaced D., Belem M., Iopue R., Moussa Y., Ducourneau A., Gaudou B. Cartographie sémantique par zonage à direx d'acteurs : Le Ferlo (Sénégal) et ses alentours (Sénégal). *Vertigo* (soumis)

Saqalli M., Sougnabé P., Ferrant, S., Gangneron F. Exclusions foncières familiales des cadets à l'Ouest du Lac Tchad : un vivier pour Boko Haram ? Espaces, Populations, Sociétés (soumis)

Masimo Kabuanga J. Adipalina Guguy B., Ngenda Okito E., Maestriperi N., **Saqalli M.**, Rosi V., Iyongo Waya Mongo L. Suivi de l'anthropisation du paysage dans la région forestière de Babagulu, République Démocratique du Congo. *Vertigo*.

Belem M., Olaniyi A. O., **Saqalli M.**, Barbier B., Mande H. K., Tondoh J. E. 2018. Prediction of West African Cropland Dynamics under Climate Scenarios. IEEE – 1st International Conference on Smart Cities and Communities, 24-26 July 2018, Ouagadougou, Burkina Faso. <https://www.ieee-france.org/index.php/262-ieee-1st-international-conference-on-smart-cities-and-communities-24-26-july-2018-ouagadougou-burkina-faso>

Saqalli M., Gangneron F., Maire E. 2018. Dynamiques socio-environnementales pour une prospective de la couverture arborée sahélo-soudanaise : une proposition méthodologique pour un transect Niger-Bénin. Programme AMMA-CATCH 2018, UAM Université Abdou Moumouni Dioffo, Niamey, Niger 12-14/11/2018.

Belem M., **Saqalli M.** 2017. Development of an integrated generic model for multi-scale assessment of the impacts of agro-ecosystems on major ecosystem services in West Africa. *Journal of Environmental Management*. 202, 1, 117-125.

Belem M., **Saqalli M.** 2017. Development of an integrated generic model for multi-scale assessment of the impacts of agro-ecosystems on major ecosystem services in West Africa. WCNRM2017 Conference "Vulnerability and Resilience of Socio-ecological Systems" Barcelona, España. https://issuu.com/paucostafoundation/docs/booklet-2-fundacio_web

Becerra S., **Saqalli M.**, Gangneron F., Dia H. A. 2016. Everyday vulnerabilities and responses in the Malian Sahel, an indication for evaluating future adaptability to water crises. *Regional Environmental Change*, 16, 5, 1253-1265.

Ducourneau A., Ka A., **Saqalli M.** 2016. Panarchie dans le Sahel : l'initiative de la Grande Muraille Verte au prisme des relations d'influence entre acteurs. *Emulations, Revue des jeunes chercheurs et chercheuses en Sciences Sociales*, 20.

Saqalli M., Biolders C. L., Defourny P., Gérard B. 2013. Reconstituting family transitions of Sahelian western Niger 1950-2000: an agent-based modelling approach in a low data context, Cybergeog: *European Journal of Geography* 634.

Becerra S., **Saqalli M.**, Gangneron F., Dia A. H. 2013. Ordinary vulnerabilities and responses, future adaptability to water crises in the Malian Sahel (Gourma). Conférence Interactions Politiques publiques, dynamiques environnementales et pratiques sociales, Uté Toulouse 2 Jean Jaurès, France, 06/2013.

Saqalli M. 2012. Sahels North, Sahels South: Building human indicators of a relative desertification. Conférence AMMA 2012 Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine, Uté Toulouse 2 Jean Jaurès, Toulouse, France, 07/2012.

Saqalli M., Gérard B., Biolders C.L., Defourny P. 2011. Targeting rural development interventions: Empirical agent-based modeling in Nigerien villages. *Agricultural Systems*, 104, 4, 354-364.

Van Vliet N., Milner-Gulland E.J., Bousquet F., **Saqalli M.**, Nasi R. 2010. Effect of Small-Scale Heterogeneity of Prey and Hunter Distributions on the Sustainability of Bushmeat Hunting. *Conservation Biology*, 24, 5, 1327-1337.

Saqalli M., Gérard B., Biolders C.L., Defourny P. 2010. Testing social-driven family forces on the evolution of Niger Sahelian rural farming systems: A combined agent-based modelling & anthropological approach. *Ecological Modelling*, 221, 2714-2727.

Saqalli M., Gérard B., Biolders C.L., Defourny, P. 2010. Simulating rural environmentally and socio-economically constrained multi-activity and multi-decision societies in a low-data context: a challenge through empirical agent-based modeling. *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*, 13, 2.

Saqalli M., Caron P., Defourny P., Issaka A. 2009. The PBRM (perception-based regional mapping): A spatial method to support regional development initiatives. *Applied Geography*, 29, 358-370.

Saqalli M. 2009. *Little houses in the Sahel: Social and environmental transitions in Sahelian Niger*, Verlag Müller, Saarbrücken.

Saqalli M. 2008. Le pouvoir des savoirs : Enjeux et impacts de conceptions sur le développement rural pour le Sahel nigérien. *VertigO*, 8, 1.

Figure 13. Photographies illustratives prises au Niger et au Sénégal, de 2000 à 2018



Visite d'un projet dans le Fakara, Niger : la série de 4*4 climatisés et immaculés face à un simple puit, arrivés sans prévenir, illustre le rapport de domination sociale

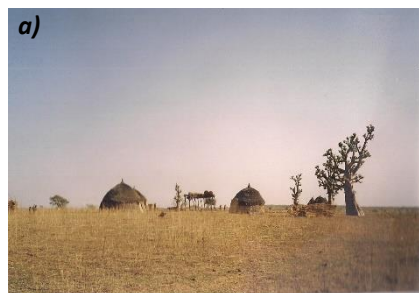


Activités agropastorales :

- a) sarclage.
- b) embouche ovine,
- c) élevage gros bovins,
- d) commerce,
- e) migration saisonnière



Le Sahel peut être verdoyant : Ferlo, août 2012, Sénégal



Incertitudes et contraintes au Sahel :
 a) Sécheresse, b) transport, c) accès à l'eau
 d) auréole des terroirs
 e) les tempêtes qui s'annoncent peuvent être bienfaites





M. Saqalli, 2000

3.3 Les Amazonies : le crépuscule des lances



Ce vaste terrain amazonien m'a été proposé quelque peu à la suite d'une conjonction : mon recrutement au CNRS et l'acceptation des projets PEPS (2013) puis ANR MONOIL (2014-2018) auxquels j'étais associé. J'y ai plongé avec l'enthousiasme du « jeune » recruté, ravi de découvrir de nouveaux enjeux et de refaire du terrain en pays du Sud. Souhaitant poursuivre et achever les travaux de l'ANR, où quelques obstacles institutionnels avaient fortement bloqué la poursuite des travaux de terrain, j'ai pu avec l'appui de Benoît Gaudou et Martin Paegelow, d'abord lancer des projets de poursuite de ces recherches (projets MSHS-T, IdA et EES-GET GHIVARO) puis co-porter deux bourses de doctorat conjointes et articulées (projets CDU MADA & PASHAMAMA) qui doivent se poursuivre jusqu'en 2021. Conscient de l'impossibilité d'une généralisation de mon terrain équatorien à l'Amazonie dans son ensemble, il paraissait nécessaire de lancer la démarche sur d'autres territoires amazoniens, ce qui a été possible en 2017 puis 2018 avec les projets FEZOAD et FEZOAD2 (Formalisation et Evaluation de l'occupation du territoire par Zonage du bassin de l'Oyapock A Dires d'Acteurs auprès de l'OHM Oyapock (Guyane française & Brésil). Une première tentative auprès du Labex CEBA, le projet MAAD (Monitoring Amazonian Aquatic Diversity) avec S. Brosse et J. Murienne (EDB) a échoué mais j'ai bon espoir de poursuivre ces recherches à la fois sur l'Oriente et l'Oyapock, voire étendre ce regard sur le Brésil.

3.3.1 Approche historique et anthropologique : une reconfiguration des espaces vécus

L'Amazonie, pris à la fois comme le bassin versant du fleuve Amazone et l'espace forestier qui l'inclut quasi-entièrement et le dépasse par le plateau des Guyanes et le bassin versant de l'Orénoque, fut décrite comme le dernier espace forestier non encore conquis par la révolution Néolithique (Mazoyer & Roudart, 1997). Cette dernière affirmation s'est avérée fautive (Valdez 2018) piétinant au passage la représentation du bon sauvage amérindien : l'Amazonie précolombienne a connu comme partout une histoire mouvementée composée de mouvements de population, d'expansions et de déclin de culture pour atteindre progressivement entre 6 et 10 millions d'habitants en 1492 (Newson, 1996 ; de Souza et al. 2018) jusqu'à la rupture colombienne, avec un effondrement de 90 % de la population par les maladies venues d'Europe. Ce choc n'a pas réinstauré un monde vierge mais est au contraire le plus puissant exemple de ce qu'un monde post-apocalyptique pourrait être : des peuples balayés par des épidémies aux structures sociales tendant à favoriser une grande résilience, bougeant souvent, n'abandonnant pas l'agriculture et l'associant avec la chasse et la cueillette (Richard-Hansen et al. 2019) pour pérenniser, créer ou fusionner des groupes sociaux (Grenand & Grenand, 1979; Davy et al. 2012; Tritsch et al. 2012).

La découverte du terrain, par la série d'entretiens ouverts, semi-ouverts et les ZADA décrits plus tard dans ce document ont permis de décrire deux Amazonies toujours périphériques d'un centre politique éloigné :

- la Guyane française, périphérie ultramarine et confettis éloigné d'une métropole de 7000 km, sur laquelle j'ai pu travailler via le projet FEZOADA doublement récipiendaire de l'appel OHM Oyapock ;
- l'Amazonie Equatorienne, séparée de sa « métropole » par une barrière physique, le versant oriental des Andes haut de 4040 m au col de la Virgen de Paramo mais aussi une barrière culturelle et socio-écologique très nette entre la forêt et la Sierra, sur lequel je travaille depuis 2013 via les projets ANR MONOIL, MSHS-GET-IDA GHIVARO et CDUs MADA-PASHAMAMA.

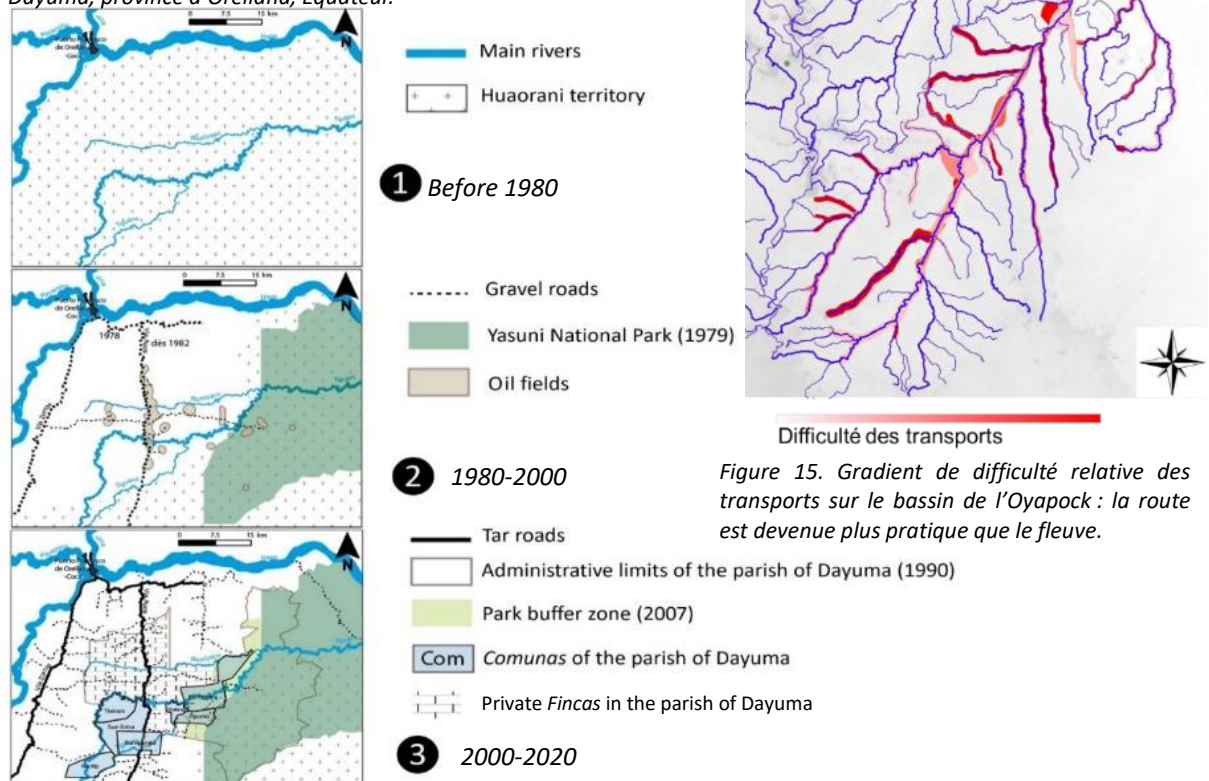
Ces deux terrains, bords extrêmes est et ouest du grand bassin, partagent un biome similaire ainsi que la présence d'amérindiens aux droits reconnus et à la situation économique et sociopolitique complexe. Ces Amazonies sont des espaces de frontière de l'œkoumène, où se déroule une deuxième colonisation humaine, un deuxième front pionnier bien plus puissant que le premier d'il y a plusieurs millénaires qui était, lui, soumis aux contingences et aux rétroactions locales. Dans les deux sites, les dynamiques en jeu sont déterminées par des forces extérieures au local, démographiques par l'arrivée de colons, économiques par le jeu des prix donnant une valeur plus ou moins forte aux terres agricoles. A l'instar du front pionnier néolithique, dans la pratique, les Amazonies représentent un seuil fluctuant entre front pionnier local s'avançant progressivement et conquête brutale. L'intérêt de ces espaces est donc double : si l'occupation de l'espace est très ancienne, on peut dater précisément le moment de contact et de mise en place de la colonisation pour assister « en direct » à ce front

pionnier. De plus, l'intrication inhérente à cette rencontre entre colons et populations déjà présentes peut se voir également et on peut alors observer l'imbrication des pratiques, des groupes sociaux et des rationalités, soulignant le poids de ces dynamiques sociales et économiques dans le processus de colonisation.

Plus encore, les enjeux, risques et objectifs de ces colonisations sont multiples : chasse et pêche, agriculture, bois, intérêt minier ou pétrolier, légal ou illégal. Leurs conséquences en terme d'occupation de l'espace, d'organisation sociale, de devenir des populations mais aussi sur la couverture végétale et le risque sur la biodiversité (Durango-Cordero 2018) le sont tout autant. Enfin, si l'inaccessibilité n'est finalement pas si insurmontable, 1 jour de bateau pour Camopi, de voiture pour Dayuma mais 2 à 3 jour pour Trois-Sauts ou pour Dicaro et la frontière péruvienne (Figure 14), l'inaccessibilité sociale est un obstacle : nombreux sont ceux qui viennent chercher une projection de ce que n'est pas la civilisation occidentale, et cette binarité somme toute sommaire doit être levée pour observer. Comme toute recherche socio-anthropologique basée de la modélisation, ce sont des recherches qui demandent du temps sur place, temps qui manque toujours au chercheur. Dans les deux sites, les mêmes dynamiques se dessinent à des degrés divers et se combinent :

- La route aux dépens des fleuves : la première vague de colonisation, une fois la transition démographique lancée, a d'abord été le fait des kichwas des piémonts amazoniens s'installant par petites communautés ou familles le long des cours d'eau, jouant le rôle de colporteur et d'agriculteur pour les Shuars ou les Huaorani de l'intérieur (Figure 14). A l'échelle de l'Oriente, la colonisation par les rivières se poursuit dans l'intérieur mais est remplacé par une colonisation des pistes latéritiques et des routes goudronnées : là où, 40 ans auparavant, la seule voie de communication était les fleuves, la jeune génération ne navigue plus. Les colons roulent dans les zones colonisées et sont maintenant en majorité urbains, les amérindiens et les descendants des colons agriculteurs naviguent dans l'intérieur. La même dynamique s'observe sur le bassin de l'Oyapock mais avec 50 ans de décalage : le « potamo-oekoumène » de ce bassin, voie de communication, de vie et de nourriture, se différencie entre amont et aval : l'amont se repeuple grâce à la croissance démographique importante des amérindiens (jusque 4 enfants par femme). L'aval se concentre sur les routes, la colonisation brésilienne sur les deux berges faisant basculer la majorité de la population vers un style de vie urbain et routier (Figure 15) (Boudoux d'Hautefeuille, 2014 ; Saqalli et al. 2018).

Figure 15. Reconstitution historique de l'occupation du territoire de Dayuma, province d'Orellana, Equateur.



- La rente aux dépens du vivrier : la colonisation n'a jamais été forte en Guyane mais plusieurs ruines (Regina, Saut Maripa) attestent des tentatives de mettre en place une agriculture d'exportation qui ont échoué. Les fermes créoles ou Saramaka souffrent de l'âge avancé de la plupart de leurs exploitants (en particulier à Ouanary) et il n'y a plus d'installation de jeunes agriculteurs sur la rive française de l'Oyapock, contraints par une législation forestière restrictive (Davy et al. 2012 ; Sévelin-Radiguet, 2012 ; Tritsch et al. 2012 ; Richard-Hansen et al. 2019). De même, en Oriente, les projets agricoles issus de la vague de colonisation et basés sur les cultures de rente sont abandonnés progressivement, victimes également de l'âge des colons : les abattis deviennent des zones de replis familiaux où les grands-parents résident, avec des cultures vivrières où le manioc a une place préminente. Seules des exploitations le long de la route pourraient être rentables¹⁶ et s'orienter non plus vers la rente pour de lointains marchés (salaires et transports rédhibitoires en Guyane, transport rédhibitoire en Oriente) mais vers l'approvisionnement, surtout maraîcher, en viande ou en volailles, pour les marchés urbains des capitales provinciales : Coca, Lago Agrio, Tena, Puyo ou Macas en Oriente, Oiapoque-St-Georges ou Cayenne pour la Guyane et le bassin de l'Oyapock. Dans les zones autorisées (en dehors des parcs et des terres indigènes en Equateur, en Amapa), des grandes exploitations de rente font suffisamment d'économies d'échelle pour être rentables (palmier à huile).
- Les mines aux dépens des champs : La chute des prix de la majorité des produits tropicaux destinés à l'exportation a rendu la plupart des cultures de rente peu concurrentielles dans les deux sites. Comme montré dans Morin & Saqalli (2017), l'agriculture en Oriente pétrolier, après une phase d'expansion jusqu'aux années 90, s'est resserré autour des axes routiers et la zone de Sacha décrite plus haut. Le pétrole est l'activité structurante de l'Oriente septentrional (Durango-Cordero, 2019 ; 2020 ; Houssou et al. 2019). L'activité en augmentation est dans les deux cas minière : l'or par orpaillage illégal et par exploitation légale ou illégale dans l'Oriente méridional (provinces de Zamorra-Chinchipe et Morona-Santiago) (Figure 16).

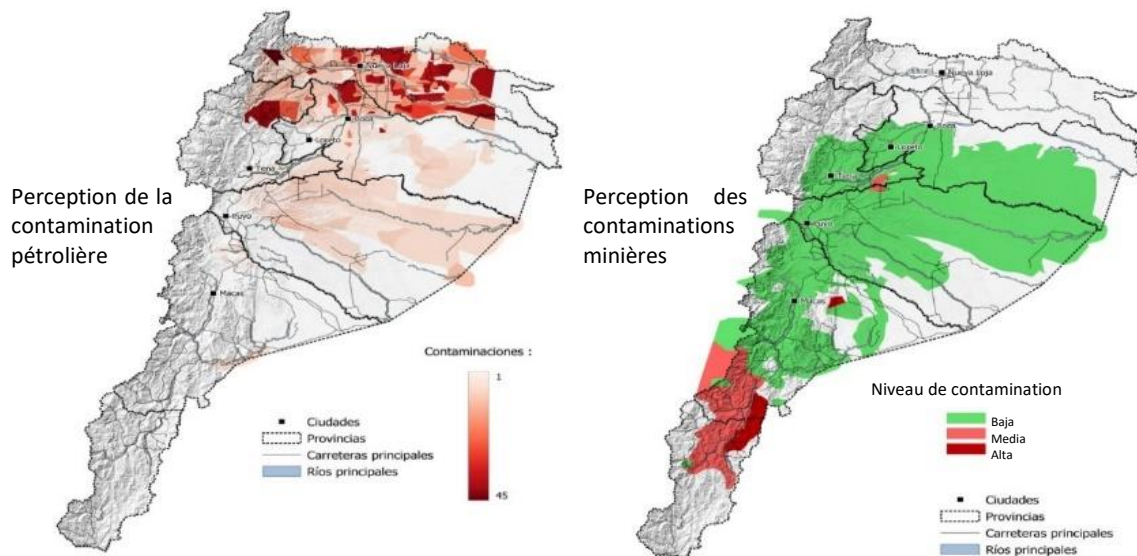


Figure 16. Perceptions des contaminations pétrolières et minières dans l'Oriente Amazonien (Equateur)

- Entre la forêt et la ville, point de campagne (Saqalli et al. 2020) : Nos travaux à l'interface anthropologique et géographique soulignent que les sphères de vie s'étaient additionnées, un monde rural s'ajoutant à la forêt, puis un noyau urbain (et éventuellement le noyau minier). En Oriente, les décennies récentes voient la disparition de ce monde rural, le campo. On constate la même dilution du rural sur le bassin de l'Oyapock, à tout le moins côté Guyane française. Ne reste que les villes reliées par des routes, plus loin la forêt irriguée

¹⁶ A l'exception de trois zones : la région de Sacha, au sol particulièrement fertile, d'origine volcanique, (Custode & Sourdat, 1986) renforcée par le fait qu'elle est le lieu des plus grands gisements pétroliers et par conséquent des bassins de population les plus importants ; le plateau laitier de Puyo et le plateau agrumier de Loreto, tous deux en altitude bénéficiant ainsi de terres plates, de sols moins lessivés et d'un climat moins pathogénique et propice à la vernalisation.

par les rivières et les points miniers s'étalant. La conséquence en est que les tenants de ce campo, les colons et les créoles pour simplifier, assument progressivement leur appartenance à un ensemble plus puissant, soit la ville pour ceux, jeunes surtout, qui y espèrent une vie « comme tout le monde », soit la forêt au sens large : c'est le sens du titre de l'article paru en 2020 : « Somos Amazonía », lui-même transcription d'un T-shirt porté par le chef et fondateur d'une communauté Shuar (Saqalli et al. 2020).

3.3.2 Approche spatiale : colonisation progressive et reconfiguration des identités locales

Les résultats des approches spatiales viennent confirmer ces regards agro-économiques (Morin, 2015 ; Morin & Saqalli, 2017 ; Houssou et al. 2019) et anthropologiques (Béguet, 2016 ; Saqalli et al. 2020) : Les ZADAs réalisés sur les deux terrains ont tous deux recensé la notion de groupe ethnique (Figure 17) et font apparaître :

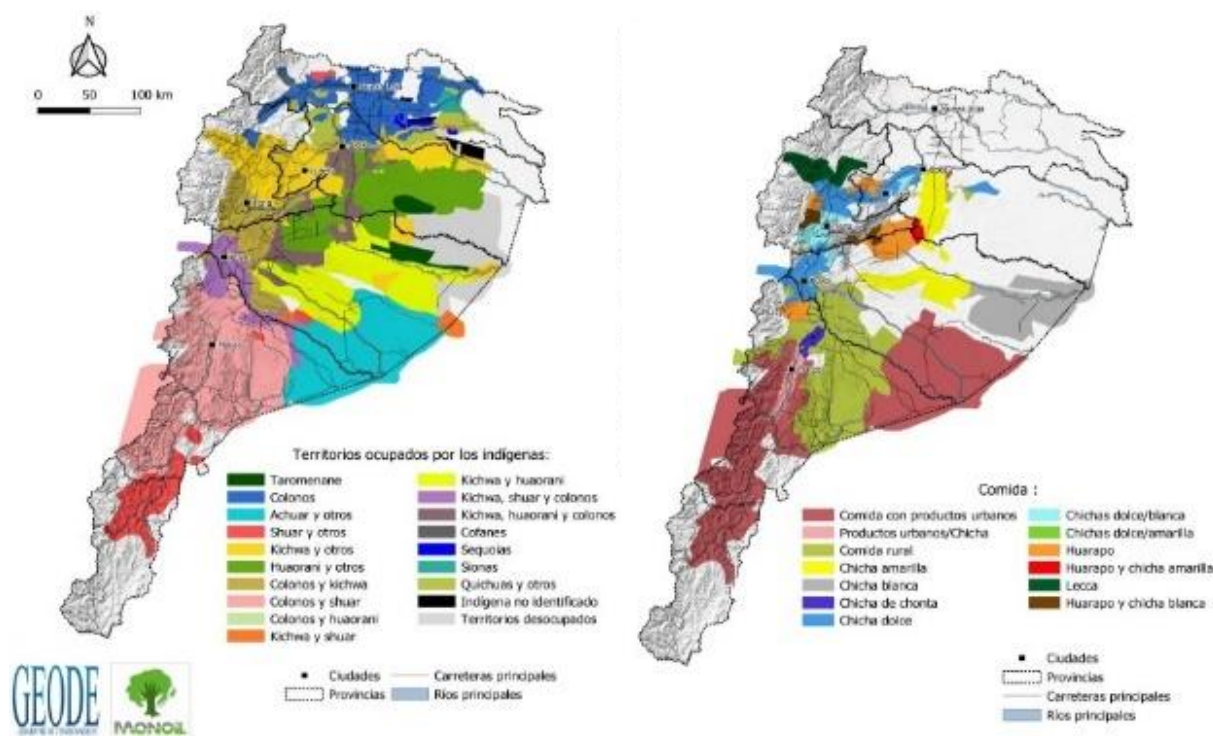


Figure 17. Perceptions des groupes ethniques et des identités alimentaires en Orient Amazonien (Equateur) et sur le bassin de l'Oyapock (Guyane française & Brésil).



- D'une part l'infiltration progressive des colons, quelles que soient leurs origines : En Equateur comme au Brésil, la grande vague de colonisation s'est peut-être tarie (ou ralentie dans le cas du Brésil) mais elle pourrait être réactivée face aux difficultés économiques et aux orientations politiques qui affectent et qui vont affecter ces territoires dans les prochaines années. En Equateur, l'installation de colons de la Sierra et de la Costa se poursuit mais se cantonne aux villes capitales de province. Cependant, les kichwas en pleine expansion accélèrent leur colonisation séculaire le long des fleuves dans les zones non connectées aux réseaux routiers, comme au siècle dernier mais plus rapidement. Sur le bassin de l'Oyapock, la rive Brésilienne derrière Oiapoque et le long de la route BR-156 jusque Macapa est également mitée par l'arrivée

régulière de colons brésiliens et de l'expansion agricole, retenue seulement par les réserves amérindiennes Wayãpi et le Parc Cabo Orange sur la côte de l'Amapa.

- D'autre part, le métissage des peuples entre les descendants des différents peuples présents sur place : ainsi en Equateur, les zones centrales et en bordure de rivière dans les zones amérindiennes sont en majorité composées de métis kichwa-Ashuar ou kichwa-Shuar selon les endroits. De même, la zone de colonisation dans les provinces d'Orellana voit des villages composés de familles kichwa-colonos voire shuar-colonos ou shuar-kichwa. Ce métissage se retrouve dans les pratiques culinaires où certaines recettes de chicha (la bière de manioc commune au bassin amazonien) sont réappropriées au travers des mariages mixtes nombreux quasiment indépendamment des groupes ethniques d'origine (Poulain, 2002). : L'article *Somos Amazonia*, accepté dans *Perspectiva Geográfica* en 2020, illustre cette nouvelle identité « locale », combinant l'indigène ou l'autochtone en cherchant de manière volontaire les points communs entre indigènes et entre ceux-ci et anciens colons aux mœurs vues comme semblables, pourtant rivaux dans le passé, et cela car tous font face aux pouvoirs extérieurs, privés ou publics : ce qu'on mange, cultive, cueille et chasse sont les meilleurs définisseurs de la manière dont on se voit et de ce qui réunit. L'équivalent sur le bassin de l'Oyapock se fait sur St-Georges mais aussi sur la zone de contact Camopi-Villa Brasil en Haut-Oyapock où les couples et les enfants créole-brésilien, amérindien-brésilien prennent de l'importance.

Ainsi, en termes d'organisation du territoire, on retrouve sur ces deux exemples d'Amazonie, à la fois la persistance entre bord anthropisé et hinterland enforesté, structuration en « pays » socio-agricole et organisation radiale autour des axes de communication, d'abord les fleuves puis les routes. La figure 17 illustre cette organisation pour les deux sites :

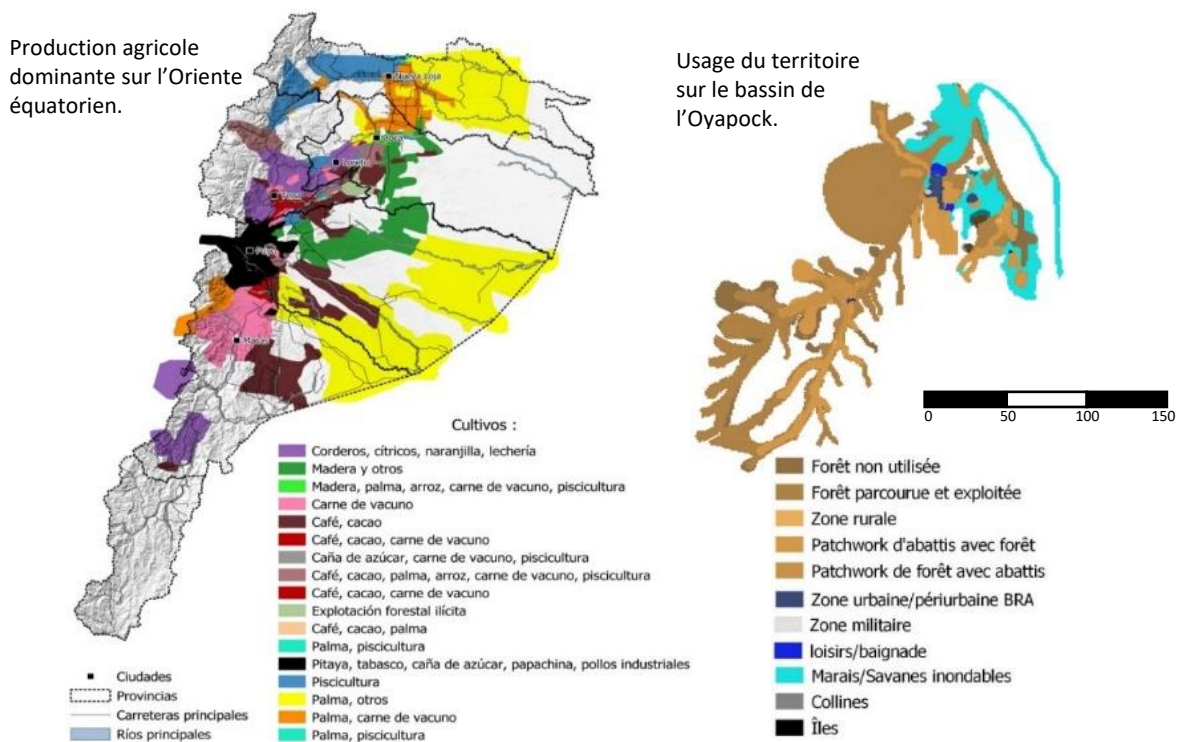


Figure 18. Principaux usages du territoire en Amazonie Equatorienne et sur le bassin de l'Oyapock (Guyane française & Brésil)

3.3.3 Modélisation de la colonisation agraire, de la contamination et de l'usage des terres

Colonisation

La construction du modèle PASHAMAMA¹⁷ a permis la reconstitution de la colonisation du territoire de la paroisse de Dayuma (province de Orellana, centre-nord de l'Amazonie équatorienne) par intégration des règles

¹⁷ Prospective Adaptability through Scenarios-based Hypotheses And Multi-Agent Modeling of Ecuadorian Amazon

de choix des terres défini dans l'étape précédente, un diagnostic des rationalités et des hiérarchies perçues localement de paramètres du territoire (distance à la route en temps de trajet, qualité des sols : Figure 19)

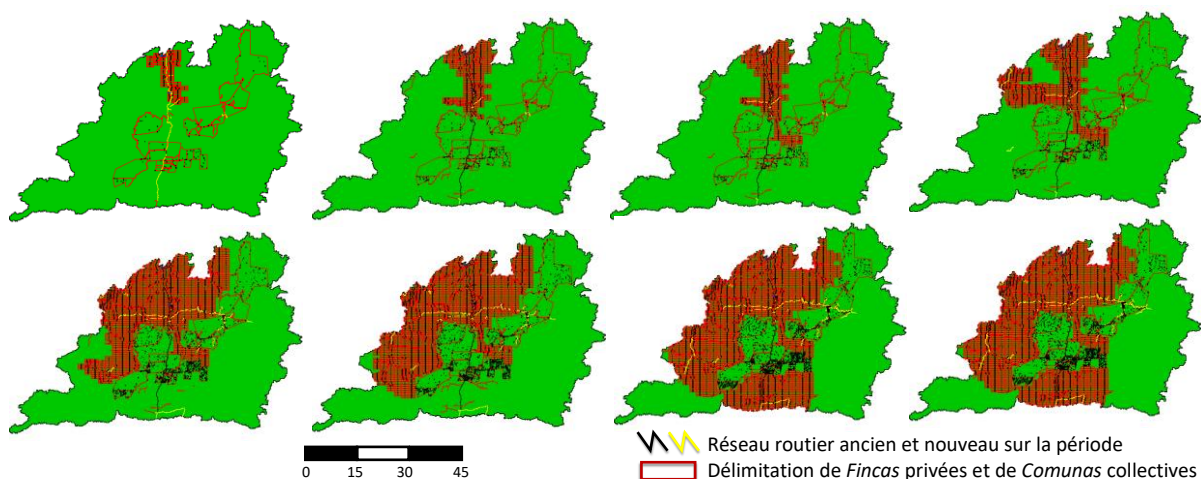


Figure 19. Reconstitution par simulation multi-agents de la colonisation de la parroquia de Dayuma. (Houssou et al. 2019).

La maille spatiale choisie est l'hectare et la maille temporelle le mois. Cette reconstitution est « validée » par comparaison avec la reconstitution de la déforestation faite par J Durango-Cordero (Figure 20), comparaison présentée dans le Tableau 7.

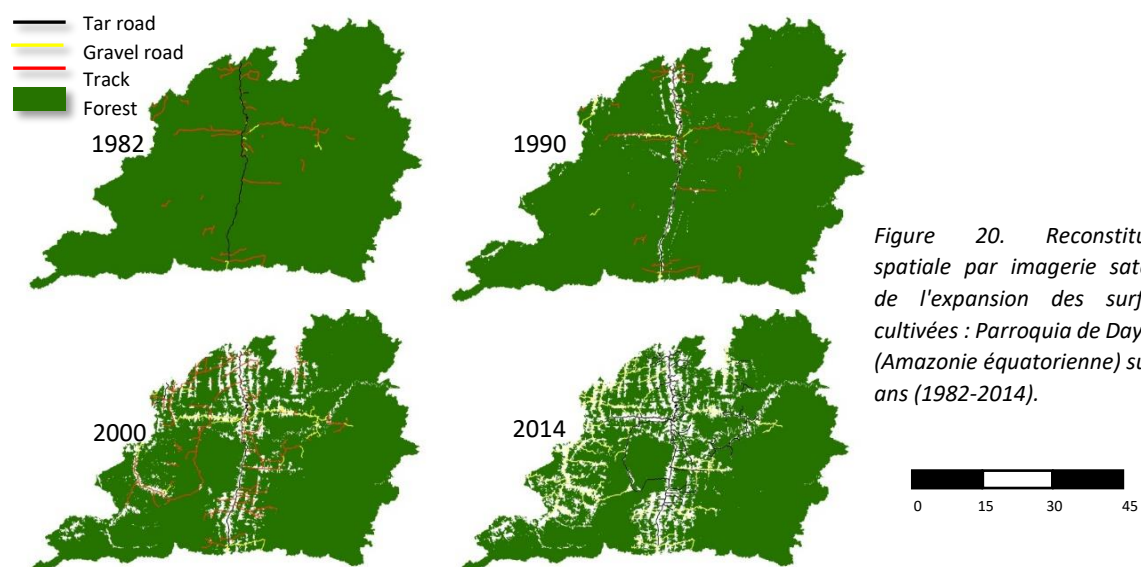


Figure 20. Reconstitution spatiale par imagerie satellite de l'expansion des surfaces cultivées : Parroquia de Dayuma (Amazonie équatorienne) sur 32 ans (1982-2014).

Tableau 7. Evolution de l'étendue enforestée dans le bassin versant de la Parroquia de Dayuma : comparaison entre données de couverture du territoire par imagerie satellite et sorties du modèle PASHAMAMA

Year	Forest (km ²)	% loss	Data & Scale	Simulation outputs*
1982	2,881	-----	Landsat ETM+ 1:250,000	-----
1990	2,812	-2.4	Landsat TM & ETM+ 1:250,000	-2,80%
2000	2,582	-10.4	Landsat TM & ETM+ 1:100,000	-10,10%
2014	2,397	-16.8	Landsat 8 & Rapid-Eye 1:100.000	-14,63%

Using 2.625; 7.91; 9.69 & 12.5 ha per colono family & 1.25; 1.25; 2.625 & 2.625 per native family for 1982; 1990; 2000; & 2014, respectively, following Morin (2015)

Contamination

La contamination pétrolière était l'objet initial du projet ANR Monoil. En Guyane, les enjeux de pollution au mercure par l'orpaillage sont immenses et étaient d'ailleurs l'objet du projet MAAD (Monitoring Amazonian Aquatic Diversity) déposé avec S. Brosse et J. Murienne (EDB).

En Equateur, le rythme et la puissance des « derrames » ou accidents pétroliers ont été simulés à partir des données sur quelques blocs pétroliers. Nous avons généralisé la fréquence des accidents et la moyenne des volumes des déversements et créé ainsi des occurrences randomisées mais statistiquement correctes des contaminations pétrolières. En incluant les flux d'eau (pluies, ruissellements et écoulement de rivière), nous reconstituons des taux de contamination. Cette démarche a été réalisée par deux outils différents : modèle multiagent par L. Houssou puis A. Richa, D. Kaced et R. Méjean (Figure 21) et reconstitution SIG pour en voir le cumul par J. Durango-Cordero (Figure 22 montrant la composante atmosphérique de cette pollution).

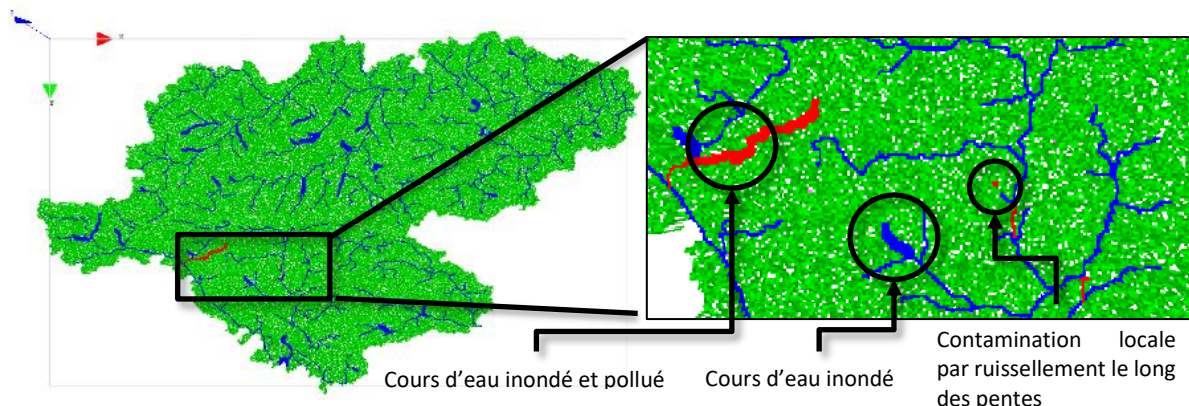


Figure 22. Effets conjoints des pollutions des rivières et des inondations sur le bassin versant de Pacayacu.

a) Infrastructures produisant de la pollution aérienne : puits et torchères, réservoirs de pétrole et de gaz, raffinerie et principaux champs de pétrole.

b) Estimations des suies et poussières de carbone relâchées dans l'atmosphère

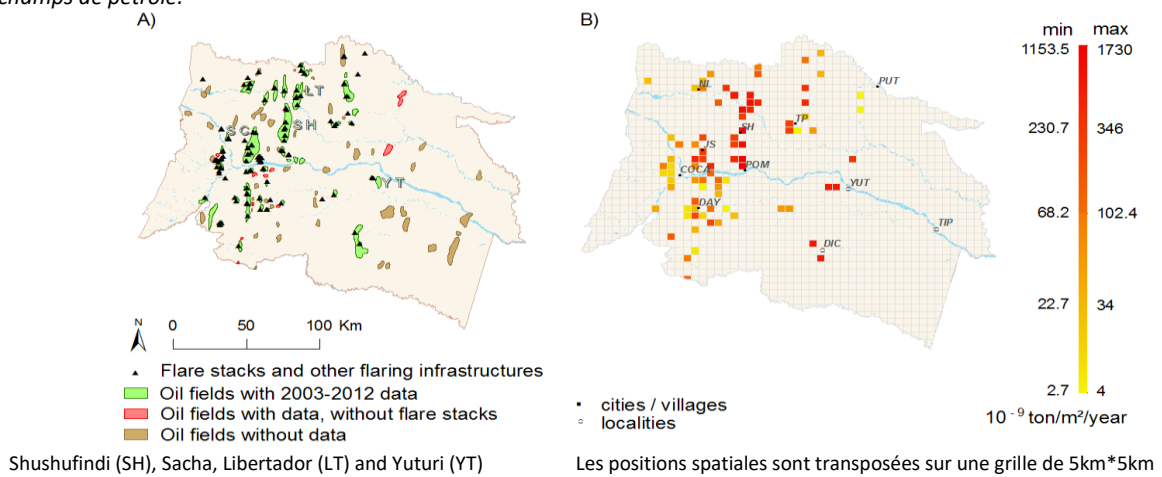


Figure 21. Pollution atmosphérique simulée par SIG des provinces d'Orellana et Sucumbíos.

L'étape de reconstitution des flux hydriques est grandement facilitée par la mise à disposition de couches libres d'accès, d'abord le climat avec WORLDCLIM (Hijmans et al. 2005 ; Fick & Hijmans, 2017)¹⁸, l'altitude et la bathymétrie avec l'USGS, la géologie avec le BRGM, la pédologie avec le site ESDAC de l'UE et l'ESA ou SOILSGRID, d'innombrables sources libres avec OPENGEOGDATA, GEOPORTAIL, la couverture et l'usage des terres avec les

¹⁸ Qui donne accès à une couverture mondiale des précipitations et des températures par interpolation des relevés mondiaux sur la période 1950-2000

sites COPERNICUS de l'UE, BiodIVERSA, SANDRE pour l'eau, etc. Contrairement à mes premières années de recherche, la disponibilité en ligne de données spatiales ne fait plus défaut : modéliser les sociétés est ainsi devenu d'autant plus pertinent que les données biophysiques ne sont plus tant à récolter ou un obstacle en pratique. La démarche d'aller piocher systématiquement dans ces données libres d'accès et fiables sera poursuivie dans les travaux suivants. L'intégration de ces couches sur SIG a été permise par la reconstitution des réseaux hydriques et en particulier des connectivités entre tronçons de rivière et leurs ordres de Strahler (1957) avec l'outil Rivertools d'ArcGIS, explorée avec l'aide d'Emilie Lerigoleur (GEODE).

Ici apparaît le puissant avantage de la recherche cumulative : Ce résultat, complexe, est une reconstitution rétrospective de l'exposition d'une population à un risque chronique. C'est en fait une combinaison de modules simples, exposés dans les étapes précédentes, la colonisation d'une part, l'aléa pétrolier d'autre part. Les données sanitaires étant disponibles, on pourra ainsi reconstituer la vulnérabilité sanitaire de la population.

Allocation des terres

Sur cette base biophysique et démographique, nous avons rajouté un module agricole, construit à partir des terrains précédents et implémenté par D. Kaced puis formalisé en termes d'allocation spatiale par R. Méjean. Les premiers résultats permettent de rendre compte de l'effet discriminant des évolutions de prix agricoles et de la distance aux routes goudronnées. Un territoire « utile », proche des routes et des marchés urbains, s'étend et défriche : la production principale et la plus rentable est l'élevage bovin, qui est gourmand en terres. Un espace reculé et en recul, le « Campo » décrit par Eva Béguet (Béguet, 2016 ; Saqalli et al. 2020) s'amalgame avec el Bosque, la forêt, mettant ainsi colons pauvres et amérindiens dans la même situation où on doit se rabattre sur les cultures vivrières (Figure 23).

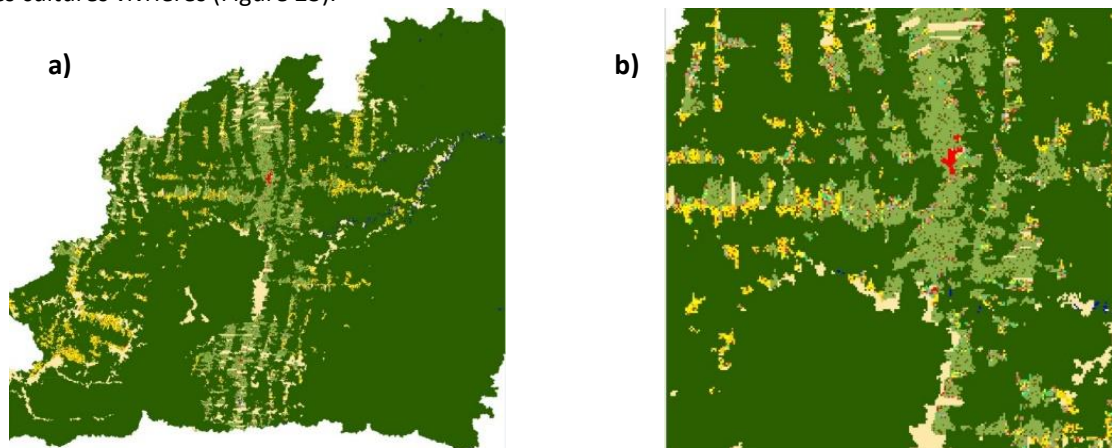


Figure 23. a) Modélisation de l'allocation agricole des terres sur la parroquia de Dayuma.

b) Détail : on voit l'organisation en lanière reconstituée, induite par le réseau de routes et de pistes et la zonation agricole (en vert l'élevage, en jaune le vivrier).

3.3.4 Conclusion partielle

Cette démarche de construction et de recherche a permis cette double reconstruction des dynamiques, historique de la colonisation et de la contamination d'une part, des rationalités différentielles et des perceptions d'autre part. Le sous-titre « le crépuscule des lances » que j'ai osé employer pour chapeauter cette description n'est ainsi pas qu'un effet de manche et un clin d'œil à un livre et à un auteur incontournable sur l'Amazonie équatorienne (Descola, 1993). Il s'agit ici d'illustrer le crépuscule d'un monde assurément, celui de la dichotomie entre amazoniens et colons, vers une population imbriquée, reconfigurant ses cultures et ses liens à la terre.

Cela ne signifie pas pour autant des perspectives d'avenir forcément prospères. L'expansion des plantations de palmiers à huile, des mines et des élevages peuvent se rajouter et même compenser les pétroliers, faisant de cet espace amazonien un Far East extractiviste perpétuel. Inversement, l'apparition d'une agriculture familiale stable avec un marché citadin également stable peut permettre la pérennité de familles dans leurs *fincas*, tant que les voies de commercialisation se maintiennent, sans le besoin nécessaire d'aller encore de l'avant pour trouver de nouvelles terres à défricher.

Enfin, face aux différentes crises économiques et sanitaires actuelles et futures, la forêt peut redevenir le refuge de familles vivant de l'agriculture vivrière, accueillant tous les agriculteurs. L'écotourisme a souvent été vu comme une sinécure mais la récente pandémie, le surenchérissement des trajets en avion, la faiblesse démographique d'une classe moyenne sensibilisée à l'environnement en Equateur et en Amérique latine en général montre en pratique que cette alternative n'a jamais été autre chose qu'un pis-aller qui ne pourra soutenir seule l'économie locale. Les possibilités réelles sont finalement peu diversifiées, les futurs aussi.

- Durango-Cordero, J., **Saqalli M.**, Ferrant, S., Bonilla, S., Maurice, L., Arellano P., Elger, A. 2020. Risk assessment of unlined oilpits to groundwater in the Ecuadorian Amazon: A modified GIS-DRASTIC approach. *Ecological Modelling* (Soumis)
- Masimo Kabuanga J. Adipalina Guguy B., Ngenda Okito E., Maestriperi N., **Saqalli M.**, Rosi V., Iyongo Waya Mongo L. Suivi de l'anthropisation du paysage dans la région forestière de Babagulu, République Démocratique du Congo. *Vertigo* (accepté).
- López F., Maurice L., Budzinski H., Le Menach K., Jamhoury H., Lerigoleur E., **Saqalli M.**, Devier M.-H., Ochoa V., Schreck E. 2020. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water and sediments at oil exploration and refining sites in Ecuador: concentrations and source distribution. *Journal of Environmental Science* (en chantier)
- Saqalli M.**, Béguet E., Maestriperi N., de Garine E. 2020. Somos Amazonia", a new inter-indigenous identity in Ecuadorian Amazonia : beyond a tacit Jus apudia of ecological origin ? *Perspectiva Geográfica*, 25, 1.
- Durango-Cordero, J., **Saqalli M.**, Parra, R., Elger, A. 2019. Spatial inventory of selected atmospheric emissions from oil industry in Ecuadorian Amazon: Insights from comparisons between satellite and institutional datasets. *Safety Science* 120, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.047>
- Houssou N. L. J., Durango-Cordero J., Bouadjio-Boulic A., Morin L., Maestriperi N., Ferrant S., Belem M., Peláez J I., Saenz M., Lerigoleur E., Elger A., Gaudou B., Maurice L., **Saqalli M.** 2019. Synchronizing histories of exposure and demography: the construction of an agent-based model of the Ecuadorian Amazon colonization and exposure to oil pollution hazards. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22, 2, 1 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/22/2/1.html>,
- Méjean R., Paegelow M., **Saqalli M.**, Kaced D. 2019. Business-as-Usual Scenarios in Land Change Modelling by Extending the Calibration Period and Integrating Demographic Data. *Geospatial Technologies for Local and Regional Development*, 243-260. Springer, Cham.
- Durango Cordero J. S., **Saqalli M.**, Laplanche C., Locquet M., Elger A. 2018. Spatial analysis of accidental oil spills using heterogeneous data: a case study from the northeastern Ecuadorian Amazon. *Sustainability*, 10, 12, 4719.
- Pelaez J. I., Vaccaro G., Yanez E., **Saqalli M.** 2018. Un Sistemas para Detección de Contaminación por Hidrocarburos: Aplicación al Oriente Ecuatoriano. *Revista Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática: RISCI*, n° special CISCI.
- Gaudou B., Belem M. Saenz M., Paegelow M., Maestriperi N., **Saqalli M.**, Houssou L. 2018. Le modèle PASHAMAMA-MONOIL : impacts des activités pétrolières en Équateur. In : *Systèmes Complexes : de la Biologie au territoire. Les dossiers d'Agropolis International*.
- Durango Cordero J., **Saqalli M.**, Elger A. 2018. Spatialisation du risque environnemental lié aux activités pétrolières en Amazonie équatorienne. Colloque « contaminants environnementaux et santé » ESOF 2018, Université Toulouse 2 Jean Jaurès, Toulouse, France. <https://cess.sciencesconf.org/>
- Méjean R., de Meyer, C., Kaced D., **Saqalli M.** 2018. Contaminations et conflits environnementaux contrastés en Amazonie équatorienne : une approche par la cartographie participative. Colloque « contaminants environnementaux et santé » ESOF 2018, Université Toulouse 2 Jean Jaurès, Toulouse, France. <https://cess.sciencesconf.org/> (hal-01781879)
- Kaced D., Méjean R., Richa A., Gaudou B., **Saqalli M.** 2018. PASHAMAMA: An agricultural process-driven agent-based model of the Ecuadorian Amazon. MABS 2018: 19th International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation. Stockholm, Sweden. <http://iotap.mau.se/mabs2018/>
- Rojas Cifuentes C., Maire E., Fozzani J., Davy D., dos Santos Alves M. J., **Saqalli M.** 2018. Pluris Homo Potamos : Enjeux socio-économiques et environnementaux autour du fleuve Oyapock : Premiers apports de la méthode de cartographie ZADA (Zonage A Dires d'Acteurs). Colloque Circulations, frontières et villes dans les Guyanes. 08-09/11/2018. Université de Guyane, Cayenne, France.
- Saqalli M.**, Méjean R., de Meyer C. 2018. Algunos resultados de las cartografías con actores (CADA) realizadas en el territorio del Oriente. *Restitución Programa MONOIL*, 28/04/2018. Universidad Estatal Amazónica de Puyo, Equateur.
- Morin L., **Saqalli M.** 2017. Una historia agraria al amparo del petróleo: el caso de la parroquia de Dayuma. *Huellas del Sumaco*, Revista de la Universidad Estatal de Puyo, 16 I 2017.
- Saqalli M.**, Maestriperi N., Jourdre M., Saenz M., Maire E. 2018. Spatialiser un risque environnemental via les perceptions locales : Une démarche, trois terrains (Equateur, Tunisie, Laos). In : M. Gaille. *Pathologies environnementale : Identifier, comprendre, agir*. Chap. 2 77-112. CNRS Editions. Paris, France.
- Lerigoleur E., Bosque S., Maestriperi N., Gil E., **Saqalli M.** 2017. Des cartes librement accessibles pour visualiser le paysage pétrolier en Amazonie. In : Becerra S., Maurice L. « Bien vivre » avec les activités pétrolières en Equateur/“Buen vivir” con las actividades petroleras en el Ecuador 12-15.
- Saqalli M.**, Maestriperi N., Lerigoleur E., Gil E., Bosque S., Morin L. 2017. Cartographie des perceptions du territoire amazonien : importance perçue des activités pétrolières. In : Becerra S., Maurice L. « Bien vivre » avec les activités pétrolières en Equateur/“Buen vivir” con las actividades petroleras en el Ecuador 12-15.
- Maestriperi N., **Saqalli M.** 2016. Assessing Health Risk Using Regional Mappings Based on Local Perceptions: A Comparative Study of Three Different Hazards. *Human and Ecological Risk Assessment Journal*, 22, 3, 721-735.

Pelaez J. I., Vaccaro G., Yanez E., **Saqalli M.** 2016. Un Sistemas para Detección de Contaminación por Hidrocarburos: Aplicación al Oriente Ecuatoriano. CISC Orlando 2016 (Best article).
 Durango J., **Saqalli M.**, Maurice L., Elger A. 2016. Heterogeneous data mining for a semi-quantitative risk assessment of oil contamination from multiple-sources in the Ecuadorian Amazon. IEMS Conference Toulouse.
 Chapotat W., Houssou L. J. N., **Saqalli M.**, Gaudou B., Lerigoleur E., Maestripiéri N., Bouadji-Boulic A. 2016. An agent-based model of the Amazonian forest colonization and oil exploitation: The Oriente study case. IEMS Conference Toulouse.
Saqalli M., Dosso M. 2011. Draped heterogeneity, forced uniformity: when agro-environmental policies drive family evolutions: The U Minh Thượng forest reserve, Mekong delta, Vietnam. Field Actions Science Reports, 5.
 Van Vliet N., Milner-Gulland E.J., Bousquet F., **Saqalli M.**, Nasi R. 2010. Effect of Small-Scale Heterogeneity of Prey and Hunter Distributions on the Sustainability of Bushmeat Hunting. Conservation Biology, 24, 5, 1327-1337.

Figure 24. Photographies prises en Guyane française et en Amazonie Equatorienne, de 2013 à 2019



Contraintes en Oriente Equatorien : entre contamination pétrolière et difficultés d'accès



Trois futurs possibles : a) forêt se maintenant, b) plantations ou c) petite agriculture paysanne ?



La route a) remplace progressivement les fleuves b), mais la ville ne connait pas forcément mieux la forêt c)



Pêche a), chasse, agriculture b) coupe de bois c), urbanisation d). Le chercheur sert de témoin e)



3.4 Les Néolithiques : l'Europe, ce Nouveau Monde



Découvrir le monde de l'archéologie fut pour moi une rupture et une gageure. Entré dans le cadre du projet ANR OBRESOC (direction J.-P. Bocquet-Appel), il s'agissait d'envisager, quasiment *ex nihilo*, un système agraire complet, y compris ses variations selon les lieux pour une même culture. Cette culture était la première société agropastorale Néolithique à coloniser l'Europe du Nord et du Nord-Ouest alors peuplée de chasseurs-cueilleurs paléolithiques. L'approche de modélisation des socio-écosystèmes que je concevais alors, intégrant les dynamiques sociales, ne pouvait être entreprise faute d'interviews possibles. Les pratiques agricoles, et même les champs ne pouvaient être observés. Certes, il apparaissait clair que ma connaissance des systèmes agricoles non mécanisés, des contraintes agronomiques, basées sur la fertilité des sols, les rythmes saisonniers, les contraintes en main d'œuvre, ce regard plus concret que les partenaires du projet me prêtaient, paraissait un atout important pour ce projet. Il fallait cependant tout apprendre des contraintes de la recherche en paléo-environnements et en archéologie, et d'abord le peu de données en pratique que l'on tire du sol, l'impossibilité d'une approche systématique ou au moins géostatistiquement valable et l'omniprésence des questions de taphonomie différentielle. Le projet OBRESOC se poursuivait en cherchant un équilibre à la fois humain et scientifique pour se heurter en 2012 comme de juste aux problèmes d'échelle, présentés ci-dessous et récurrents. J'avais pu entre-temps être de manière inespérée recruté au CNRS et je plongeais dans ma nouvelle affectation avec enthousiasme. Mon retour sur ces enjeux se fit vers 2015 via L. Carozza et A. Burens de mon laboratoire GEODE¹⁹, grâce à qui j'ai pu être mis en contact avec le programme MISTRALS-PALEOMEX (puis MISTRALS SICMED) : en fin de ce programme, l'idée de combiner les résultats de terrain apparaissait à la direction de ce programme (L. Carozza puis L. Lespez, M.-A. Sicre) utile en termes de compilation, de valorisation et d'affichage et une modélisation semblait adéquate. Mon implication sur ce thème est donc centrée sur ces deux projets, par lesquels j'ai pu développer une réflexion méthodologique à l'origine du projet éditorial dans la série *Simulating the Past books Series* de Springer Editions.

3.4.1 Colonisation rubanée en Europe du Nord : le projet ANR OBRESOC

Deux questions de recherche en un projet

La culture rubanée (autrement appelée LBK pour Linear Bandkeramik, terme allemand d'usage courant) a été la première société agropastorale à s'installer en Europe continentale centrale et du nord-ouest entre 5600 et 4900 avant J.-C., apportant avec elle une culture matérielle presque entièrement homogène²⁰ ainsi que des normes architecturales stables²¹. La typologie de la céramique indique que son origine se situe dans la région des Balkans et des Carpates, en particulier la phase tardive du complexe Starčevo (Lichardus & Lichardus-Itten 1985 ; Gronenborn 2003). Le LBK a d'abord remonté le Danube entre Alpes et Monts Moraves et s'est d'abord étendu vers l'est, jusqu'en Ukraine, puis vers l'ouest, atteignant la vallée du Rhin vers 5300 avant J.-C. avant de coloniser le bassin parisien jusqu'à environ 4900 avant J.-C. (Mazurié de Keroualin 2003 ; Crombé & Vanmonfort 2007).

Si le paquet culturel et cultural rubané est bien connu, le système d'exploitation agricole rubané est toujours en discussion. Le modèle de la culture itinérante a longtemps été considéré comme le plus adapté à la propagation néolithique dans les zones boisées d'Europe (Childe 1929 ; Boserup 1976 ; Mazoyer & Roudart 1997). L'investissement technique est faible (pas de labour), ce qui permet d'obtenir des rendements élevés, bien que la préparation des terres pour les semis nécessite beaucoup de travail. C'est le modèle le plus parcimonieux en ce qui concerne la ressource la plus rare, c'est-à-dire le travail. Certes, un système de culture itinérante a été

¹⁹ Ceux-ci avaient déjà essayé de m'intégrer plusieurs fois dans leur recherche via la soumission de projets ANR. Qu'ils en soient ici remerciés de même que je les remercie pour leur intervention lors de réunion.

²⁰ Les mêmes espèces végétales (blé amidonnier, lentilles, lin) et animales (bœufs, porcs, moutons, chèvres) et les mêmes poteries, rayées de rubans tracés (d'où le nom de rubanés).

²¹ Le même style de maisons, particulièrement longues, organisées en plusieurs pièces juxtaposées.

pratiqué par les premières sociétés agro-pastorales d'Europe centrale et du Nord-Ouest (Bogucki et Grygiel 1993 ; Bogaard 2002), tandis que les premières propositions alternatives de culture itinérante remontent au début des années 70 (Modderman 1971 ; Kruk 1973 ; Lüning 1980, 2000 ; Rowley-Conwy 1981). Plus récemment, l'analyse de plusieurs assemblages d'adventices en sites rubanés y a montré que la proportion et les espèces de plantes annuelles semblent bien au-delà du domaine de la plausibilité d'une agriculture itinérante (Bogaard 2002 ; 2004 ; Bogaard et Jones 2007). Cette hypothèse de champ permanent n'était pas nouvelle et avait déjà été proposée (Childe, 1929 ; Iversen, 1941 ; Rowley-Conwy, 1981 ; Barker, 1985 ; Fechner et al. 1995). Cela implique cependant une main-d'œuvre plus importante que dans le système de culture itinérante sur brûlis, des rendements potentiellement inférieurs, même avec un investissement plus important dans le maintien de la fertilité des terres agricoles.

D'autre part, près de 1400 sites rubanés positionnés, confirmés comme étant des maisons et enregistrés en 2010, date de début de projet (sur les 5600 sites rubanés alors recensés) donnaient une idée des lieux de colonisation. Ils présentaient à la fois une forte homogénéité environnementale²² (Dubouloz, 2003 ; Dubouloz et al. 2009, qui soulignent le risque de biais taphonomique²³) (Figure 25) et une forte hétérogénéité agropastorale (Hachem, 1999 ; Bedault & Hachem, 2008 ; Dubouloz et al. 2009 ; Tresset & Vigne, 2011 ; Gomart et al. 2015) malgré un cortège d'espèces végétales et animales similaires, suggérant une adaptation d'un modèle global aux conditions locales. Ainsi, deux objectifs étaient en fait envisagés :

1. A l'échelle locale, reconstituer le fonctionnement du système agropastoral rubané et ses déclinaisons selon différents sites. Puis tester ainsi l'effectivité de l'adaptation de ces systèmes par l'inférence de mécanismes d'adaptation connus ailleurs (par exemple actuellement), socialement et techniquement concevables pour l'époque, et permettant à eux seuls d'expliquer les différentes adaptations locales ;
2. A l'échelle globale, reconstituer l'histoire de cette colonisation en lien avec l'environnement biophysique, avec la possibilité d'établir une corrélation entre ces éléments et donc « valider » ou plus formellement infirmer un déterminisme environnemental de cette expansion puis de ce déclin rapide (en 300 ans) ;

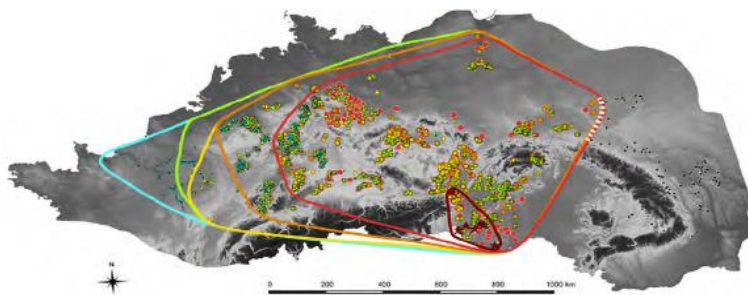


Figure 25. Disposition des sites rubanés sur l'Europe du Nord

Chaque point représente un site archéologique rubané.

(Bocquet-Appel et al. Document de projet ANR OBRESOC 2010)

Une tentative de joindre ces deux questions dans un seul modèle a été envisagée. Il s'agissait de transférer les calculs sur la carte graphique d'un ordinateur (CGU), à la plus grande puissance de calcul qu'un processeur (CPU). Malheureusement, cette démarche de transfert a échoué, du fait du temps trop important que nécessiterait l'adaptation de logiciels multi-agents pour être lu sur CGU. Ma proposition était dès lors de faire deux modèles :

1. Pour répondre à la première question, construire un modèle MASSE (modèle multi-agent formalisé de la manière décrite en §5) du SSER à l'échelle locale (pas de temps saisonnier, la famille et sa maison comme maille sociale, l'hectare comme maille spatiale) et tester sur le long terme ce modèle moyen sur plusieurs contextes biophysiques en y incluant des processus d'apprentissage dans la rationalité des agents afin d'en tirer les « performances » en termes de transformation des territoires et de puissance démographique. L'idée

²² Rarement en bord immédiat de rivière, le plus souvent terrains loessiques, à la rupture de pente sur collines, zones sans hiver long et froid : montagnes, Russie, Scandinavie

²³ Par exemple, on ne retrouve pas de sites rubanés en bord immédiats de rivière parce qu'ils ne s'installaient pas là pour éviter les inondations ou toute autre raison, ou bien parce que les sites qui auraient bien été là ont tous disparu du fait de ces inondations ?

est de créer ainsi un panel de villages-terroirs-SSERs types correspondant à différents biomes. On aurait une vingtaine de modèles-types à l'échelle de 15km*15km, soit 22 500 pixels²⁴.

2. La deuxième question passerait par la construction d'un deuxième modèle, cette fois à l'échelle de l'Europe du nord (la Figure 25 représente le territoire à modéliser) : la maille temporelle resterait la saison, la maille sociale serait le village type qui essaierait des colonies, la maille spatiale serait le carré de 15km*15km, soit 13 800 pixels.

Le poids environnemental et social des variables biophysiques

De facto, les aspects climatiques et biophysiques (pédologie et couverture végétale) ont pris un aspect important dans la modélisation, d'abord parce que les laboratoires associés au projet travaillaient d'abord sur de la reconstitution paléo-climatique. Or, une modélisation implique que les échelles soient emboîtées (si l'on veut faire cultiver des champs par des familles, alors les champs doivent être simulés, les familles exister comme entités et le cycle cultural se dérouler). Ces mailles s'imposent au reste ce qui est en contradiction avec la manière de concevoir le temps et l'espace de nombre de thématiciens associés au projet. Le temps est pour les paléoenvironnementalistes une carotte d'échantillonnage. D'un échantillon est extrait par la mise en correspondance des pollens recensés un ordre de grandeur sur les précipitations et les températures pour cette date et ce lieu. Et il est alors, étant la meilleure donnée disponible, représentatif d'une période de quelques dizaines d'années, sans information sur les saisons. Je leur demandais une délimitation précise du territoire et de la période de validité de ces résultats, une valeur moyenne de température et de précipitation pour chaque saison pour la période et l'espace considérés et les variations pour chacune de ces saisons. Cette différence d'exigence, l'une de fidélité au peu que peut donner le terrain, l'autre de nécessité pour créer un modèle utile, peut entraîner des tensions.

La fertilité des sols est ici déduite de la carte pédologique actuelle. Comme proposé par Schwartz et al. (2011), les sols actuels sont le résultat de l'évolution physique et chimique des sols de l'époque. Il est donc possible par « rétro-évolution » pédologique de reconstituer la nature de ces sols à l'époque, moins évolués car sortant depuis peu d'un climat glaciaire, de toundra ou de taïga et par conséquent de leur définir un niveau relatif de fertilité (Figure 26 a).

La végétation sur cette Europe du Nord, composée d'un cortège d'espèces qu'actuellement (hors espèces dites invasives, arrivées depuis) mais avec des poids différents, a été envisagée au prisme des usages qui pouvaient en être tirés : cueillette (Salavert, Lenneis & Saqalli, OBRESOC), chasse (Bréhard, Saqalli, Dubouloz & Hachem, OBRESOC), pêche (Saqalli, OBRESOC) mais aussi fourrage par émondage (Bendrey & Saqalli, OBRESOC). Elle dépend des caractéristiques édaphiques, donc de la fertilité reconstituée comme indiquée précédemment.

Les grandes évolutions du climat, traduit en évolutions de la température et des précipitations, étaient issues des analyses palynologiques des carottes norvégiennes et méditerranéennes (Ortu & Sanchez-Goni, OBRESOC). La constitution d'un climat, i.e. le tirage de températures et de précipitations pour chaque mois et pour chaque pixel de 1km² (format de WorldClim) suit la démarche présentée ci-joint : chaque pas de temps, température et précipitations sont tirés dans l'intervalle de probabilité de WorldClim (Mean+Std)²⁵ (Hijmans et al. 2005 ; Fick & Hijmans, 2017). Cette valeur est pondérée par l'écart à la valeur 1950-2000 des données polliniques d'Ortu²⁶ sur la moyenne mais aussi via un second tirage, sur les écarts (certaines périodes climatiques étaient plus ou moins variables par rapport à la nôtre). Enfin, ce tirage au km² est transféré à l'hectare en tenant compte de l'écart de l'altitude à la moyenne d'altitude du km² (1°C/100m de dénivelé) (Figure 26 b).

²⁴ 15km étant la distance moyenne parcourue en une journée à pied.

²⁵ Voir note de bas de page 18 : Qui donne accès à une couverture mondiale des précipitations et des températures par interpolation des relevés mondiaux sur la période 1950-2000, à partir de laquelle, par la méthode proposée en Figure 27, on peut déduire les variations saisonnières de l'époque. Depuis 2005, La même équipe WorldClim a proposé des reconstitutions climatiques pour les périodes néolithiques considérées.

²⁶ Dans la mesure où les divers sites polliniques ayant servi de référence pour ces reconstitutions sont représentatifs des diverses aires climatiques couvertes par le territoire modélisé.

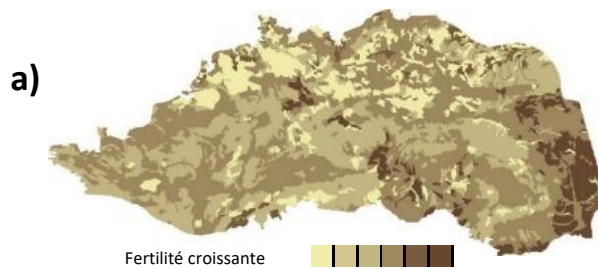
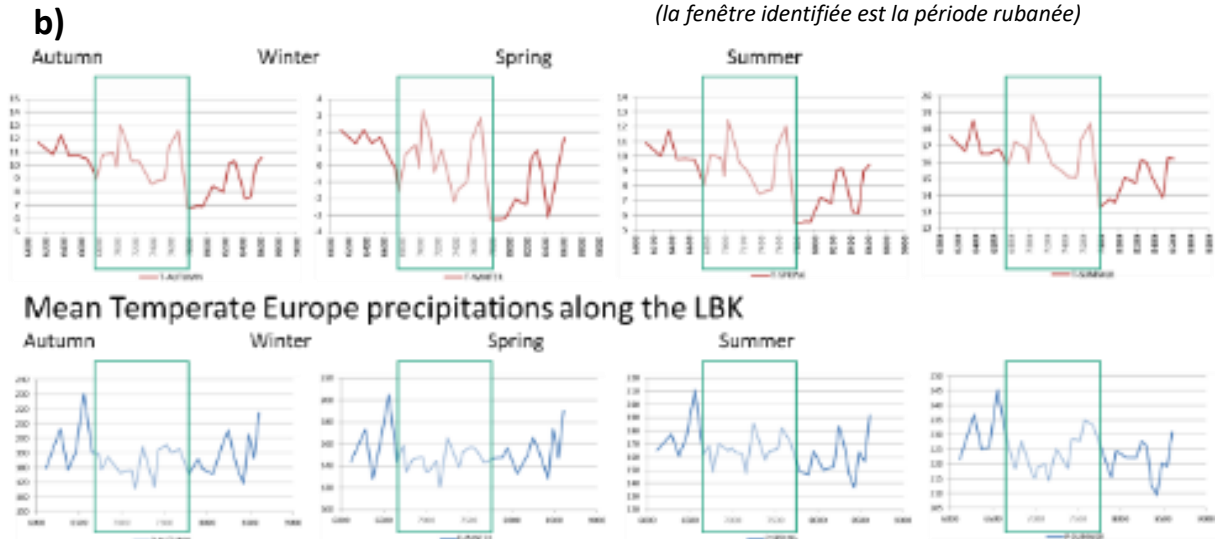


Figure 26. Reconstitutions de la fertilité des terres au début du Néolithique et des évolutions climatiques saisonnières (Température et Précipitations) sur le Néolithique

a) Fertilité des terres reconstituée préneolithique selon Schwartz et al. (2011).

b) Evolutions climatiques saisonnières (Température et Précipitations) sur le Néolithique selon Ortu et al. 2006 (la fenêtre identifiée est la période rubanée)



Ainsi, pour chaque saison obtient-on une valeur fluctuante dans la gamme et la moyenne des données archéologiques et ce, pour chaque hectare de la simulation (Saqalli, conférence AMA 2015 Figure 27). Y ont été rajoutés les accidents environnementaux dont les probabilités d'occurrence et de contagion pour les incendies ont été définies selon les saisons, les altitudes et les latitudes (gels, tempêtes et donc chablis, incendies, sécheresse), afin de rendre compte d'évènements catastrophiques impossibles à simuler avec un pas de temps de trois mois qui lissent ces évènements.

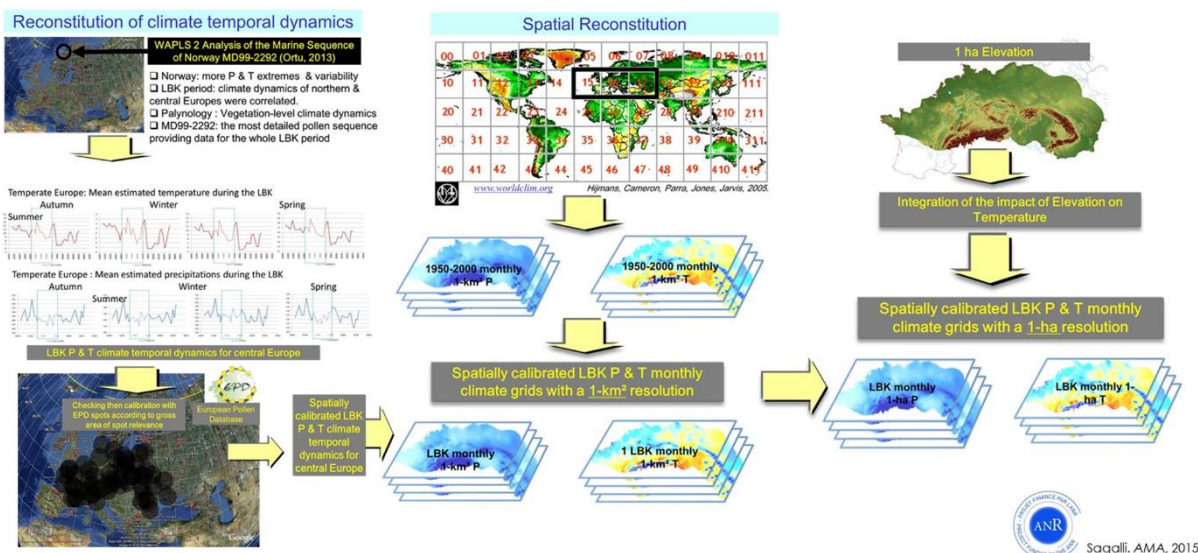


Figure 27. Faire un climat simplement ?

Les choix socio-anthropologiques sur la société rubanée

Comme dit précédemment, l'ensemble des choix se font le plus souvent par défaut, d'abord parce que l'archéologie ne donne pas d'indices pour sortir d'hypothèses les plus neutres possibles mais aussi de manière à ne pas biaiser la modélisation, les évolutions des populations simulées ne devant leurs trajectoires que par des

caractéristiques dûment choisies. Enfin, comme précisé par Verhagen & Smith (2003), augmenter la cognition des agents et la complexité de leurs rationalités crée des dynamiques hors champs par rapport à la question et l'imprécision des informations que l'on a. La socio-anthropologie propose les règles à considérer et l'archéologie dispose, en sélectionnant la règle compatible avec les données parmi les règles possibles (Figure 28)

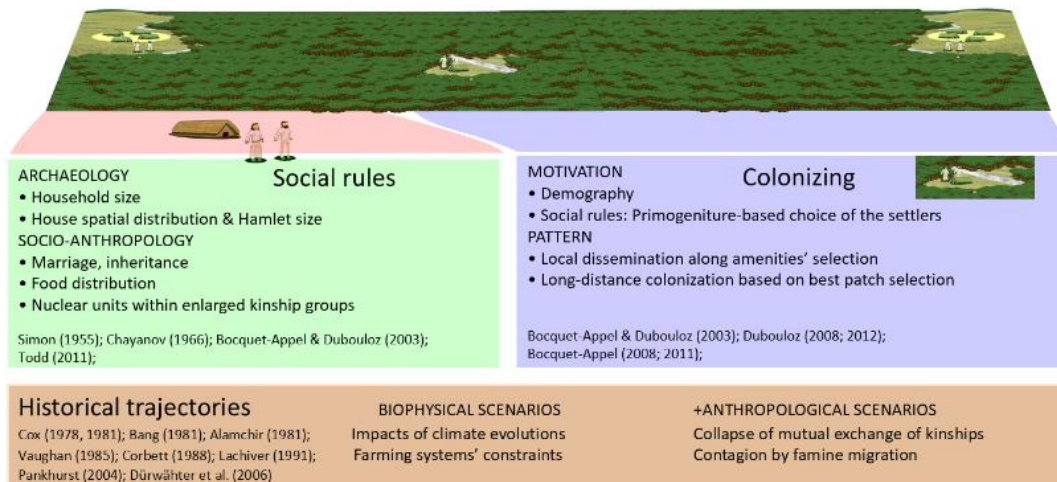


Figure 28. Composantes du système social.

Les règles sociales du village :

Suivant en cela Demoule (1999), nous sommes ici dans des sociétés acéphales ou en tout cas non stratifiées. La méthode ARDIQ a été suivie de manière informelle (voir §5.2.1). Elle a permis d'obtenir l'accord des partenaires sur ces règles sociales : si des informations archéologiques permettent de poser ces règles, elles sont ici implémentées comme étant les plus probables. Si aucune règle ne peut être déduite, on implémente les règles les moins perturbantes (Figure 29) pour le fonctionnement du système social.

- Archéologie: style maisons et démographie (Coudart, 1998; Dubouloz, 2008; autres..)
- Bilinéarité et bilocalité (Bentley, 2007; Haak *et al.* 2008; Bickle *et al.* 2011) comme hypothèse par défaut (Demoule, 1999; Todd, 2011)
- Ratio de Chayanov Consom. /Prod. => éclatement des familles (Hammel, 2005; Bocquet-Appel) => ultimogéniture
- Démographie "Random" et familles alternativement mononucléaires et élargies
- Règles commensalité définit l'accès à la nourriture donc la priorité en cas de disette



Figure 29. Règles socio-anthropologiques neutres pour la société rubanée.

Les dynamiques de colonisation : Le choix de l'ultimogéniture locale a permis de s'approcher de la vitesse de colonisation observée par le fait que seuls les aînés partent fonder de nouveaux villages²⁷. Le départ des colons est une combinaison des modes « repulse » et « attract » (Gautier, 1997 ; Bousquet & Gautier, 1999 ; Castella & Verburg, 2007 ; Rasse, 2008). « Repulse » se traduit par un effet cumulatif de réduction de la marge d'efficacité à l'heure de travail (moindre fertilité des sols, temps de trajet) (Giampietro, 1997) et de tension « AntiClan » à l'instar du modèle nigérien. « Attract » s'élabore par le dévoilement du « fog of war » progressif au fur et à

²⁷ Cette seule différence dans les âges des partants crée une vitesse de colonisation 17 à 20% supérieure à la situation avec primogéniture.

mesure des expéditions de chasse²⁸ et de la découverte de sites propices (Dubouloz et al. 2009). Le départ consiste en familles isolées, car aucun indice archéologique ne semblait indiquer de structures supra-familiales et la contrainte en main d'œuvre à l'installation semble se maintenir (Giampietro et al. 1993).

Les innovations sociales et la rationalité : elles restent limitées. Elles consistent ici en la capacité pour les agents d'évaluer leurs situations et de pouvoir essayer différentes combinaisons d'utilisation des ressources disponibles. Ainsi, si une famille rubanée pluriactive élevage-agriculture voit son activité élevage fournir plus de nourriture et plus régulièrement sur une longue période (une décennie à une génération), et que le gain marginal est supérieur aux autres activités, alors la répartition du temps de main d'œuvre disponible par famille se réoriente légèrement vers une distribution où l'élevage serait un peu plus privilégié. Les évolutions seraient ainsi graduelles et différentes d'une famille à l'autre, même sur le même site. Ainsi, une innovation est ici une spécialisation ou une diversification. Un garde-fou est maintenu par le maintien de la pluriactivité obligatoire pour chaque famille, de manière à maintenir la mémoire de toutes les pratiques possibles.

Etant donnée la stabilité des cortèges végétaux et animaux telle que recensée par l'archéologie, l'adoption de nouvelles espèces ou de nouvelles techniques n'a pas été considérée, bien qu'il existe des modèles sur de plus longues durées et de plus grands espaces qui l'envisagent (Wirtz & Lemmen, 2003 ; Fuller et al. 2010 ; van der Veen, 2010). La diffusion de ces innovations consiste en l'échange des expériences concernant les productivités marginales entre familles lorsqu'elles se rencontrent, modifiant la moyenne des espérances de chacun (Schmidt & Rounsevell, 2006 ; Manzo et al. 2018)²⁹. En introduisant une certaine inertie dans la transmission des usages d'une génération à l'autre, c'est ici l'occasion d'introduire des « cultures », chacune définie comme une forme d'usage du territoire, par exemple agro-éleveurs et agriculteurs. La rencontre sur un terrain vierge entre groupes de « cultures » différentes peut être l'occasion d'échanges d'expériences et d'une « acculturation » mutuelle ou au contraire, selon la distance entre les pratiques qui serait un proxy de la distance des « cultures », se traduirait par un conflit (Willis & Bennet, 1994 ; Rasse, 2008 ; Lemmen, 2012 ; Kohler et al. 2012).

Versions locale et européenne d'OBRESOC

Le modèle local : j'ai pu obtenir avec l'équipe du laboratoire AASPE dirigé par J.-D. Vigne, et en particulier A. Tresset, A. Salavert et S. Bréhard, une formalisation assez fine du système agraire et du système de production rubané et ce pour les différentes activités possibles : agriculture, élevage, cueillette, chasse (et de manière moindre, pêche). L'idée était, à la manière de Baum (2014), d'éviter le piège de l'étude d'un site au déterminisme environnemental trop net à l'instar des Anasazi qui vivaient dans un environnement très contraint en eau (Axtell et al. 2002 ; Janssen et al. 2003 ; Janssen, 2009 ; Kohler et al. 2012). Le modèle une fois formalisé, il a été implémenté sur le territoire de la vallée de l'Aisne, lieu de colonisation tardive des rubanés. De nombreuses hypothèses « neutres » ont été adoptées : indifférence de genre quant à la localité et à la linéarité, l'archéologie funéraire ne montrant aucun biais de genre ; pas de stratification de type lignagère, les maisons pouvant être de taille fort différente mais ne montrant aucune accumulation de même que dans le mobilier funéraire. Cela rejoint le schéma Néolithique pré-chalcolithique de J.-P. Demoule (Demoule, 1999).

Le modèle local a surtout permis de questionner l'effectivité de l'hypothèse la plus forte des archéo-paléoenvironmentalistes sur le système agricole rubané, à savoir les champs permanents. J'ai pu montrer dans l'article Saqalli et al. (2014) que cette hypothèse ne pouvait fonctionner en maintenant la fertilité des sols cultivés que par l'adjonction de pratiques culturelles et pastorales spécifiques (Nielsen et al. 2006, Mertz et al. ; 2007 ; Dupraz & Liagre, 2008). Compenser la chute de la fertilité des sols, normalement inéluctable au bout de quelques années sans pratiques dédiées, passe par des pratiques agricoles (culture de légumineuses et de céréales soit en associée soit en rotation bisannuelle). Surtout, elle doit passer aussi par le maintien d'un troupeau suffisamment important pour assurer la fumure de ces champs. Or, en milieu forestier, cela implique de compenser la faiblesse

²⁸ Qui vont effectivement de plus en plus loin au fur et à mesure de la croissance démographique et de la baisse du gibier alentour, traduisant ainsi de facto un certain effet « repulse ».

²⁹ Un important courant sur la diffusion des innovations par des approches réseau existe, par exemple Daudé (2004), Deffuant et al. (2005) ou Thiriou & Kant (2008).

du fourrage par un émondage systématique sur un rayon suffisamment grand pour assurer la survie du troupeau sur l'hiver, de 7 à 8 km autour du village et un stockage du fourrage ainsi constitué, certes de faible qualité, dans des abris disséminés, les outils de transport étant inexistant (Figure 30).

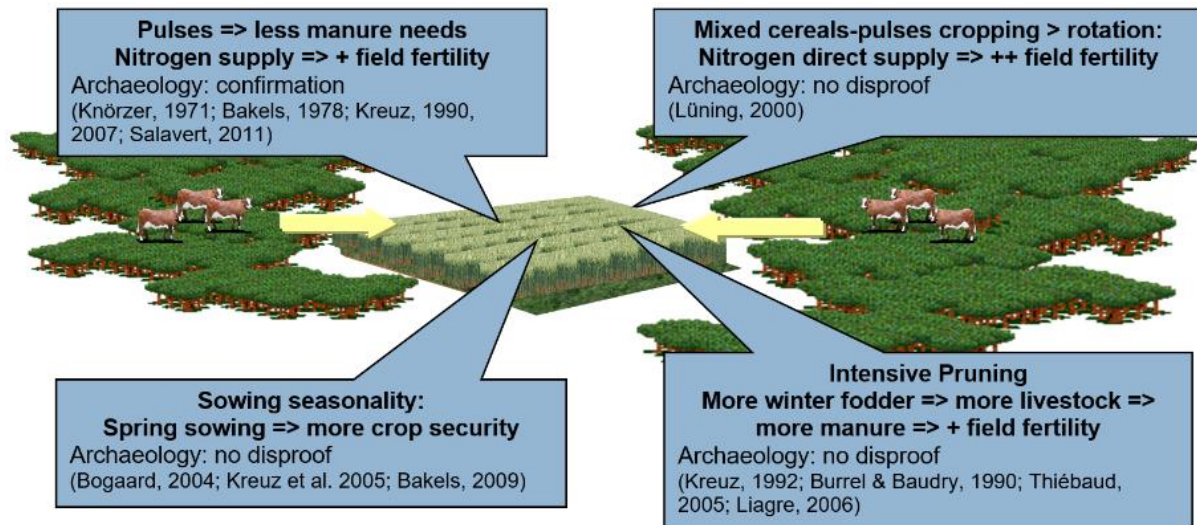


Figure 30. Propositions de pratiques de fertilisation et de sécurisation alimentaire permettant le maintien de l'hypothèse "champs permanents du système de production de la culture rubanée".

Autre résultat non négligeable : l'évaluation de la disponibilité en nourriture par habitant considérant les différentes sources possibles et la sensibilité de ces sources aux extrêmes climatiques a permis d'infirmer la possibilité d'un lien direct entre ces extrêmes climatiques (plus chaudes ou plus froides, plus sèches ou plus humides) et « collapse » local. La faible densité de population rend le gibier et les produits de cueillette abondants par habitant et permet de compenser sans problème quelques années de récolte et/ou de disparition du bétail par épizootie par exemple : ici aussi l'environnement n'explique rien à lui seul et des dynamiques sociales internes à la culture rubanée sont à considérer pour expliquer le « collapse LBK ».

La transposition de ce système agricole sur d'autres sites s'est ensuite heurtée à la mise en opposition des objectifs du projet, la priorité étant alors donnée au modèle à l'échelle européenne : en effet, deux questions étaient posées, le fonctionnement et le devenir, entraînant deux mailles et deux échelles à envisager. Le modèle local décrit plus haut a produit quelques résultats intéressants, le modèle européen choisissant de fixer les paramètres reliant démographie et environnement (1 tête de bétail par personne par exemple) n'avait plus de conditionnalités biophysiques et était mû uniquement par les paramètres démographiques déduits eux-mêmes de la base de données des sites rubanés. Plus problématique encore, cette reconstitution subit une boucle de raisonnement puisqu'elle ne dispose plus de données contre lesquelles se confronter afin d'infirmer ou au contraire « valider » les trajectoires modélisées. Cette expérience traduit ainsi la nécessité d'une bonne identification au préalable des éventuelles contradictions que plusieurs objectifs assignés à un modèle pourraient occasionner. Elle traduit aussi la nécessité d'élaborer assez en amont le protocole par lequel tout modèle est testé.

3.4.2 Paysage du Languedoc-Roussillon : le programme SICMED PALEOMEX

Le programme PALEOMEX avait consisté à financer sur la décennie 2010-2020 nombre d'actions de recueil de données sur le terrain. La structuration des acteurs travaillant sur le même territoire, ici le Languedoc-Roussillon, sur la reconstitution des caractéristiques agricoles des sociétés néolithiques et sur les paléo-environnements correspondants, est effectivement une étape primordiale au sens étymologique du terme, i.e. la première étape à réaliser (début du Néolithique sur la plaine du Roussillon entre 8700 et 7900 cal BP³⁰) (Galop et al. 2009).

³⁰ « Cal BP » est un mode de notation calendaire. BP signifie « Before Present » : afin de sortir du christianocentrisme, avec 1950 désignée par convention comme étant le présent. Les datations C₁₄ brutes n'intègrent pas les fluctuations des taux de C₁₄ atmosphériques. On les calibre par d'autres méthodes pour les transformer en « années BP calibrées » (cal BP).

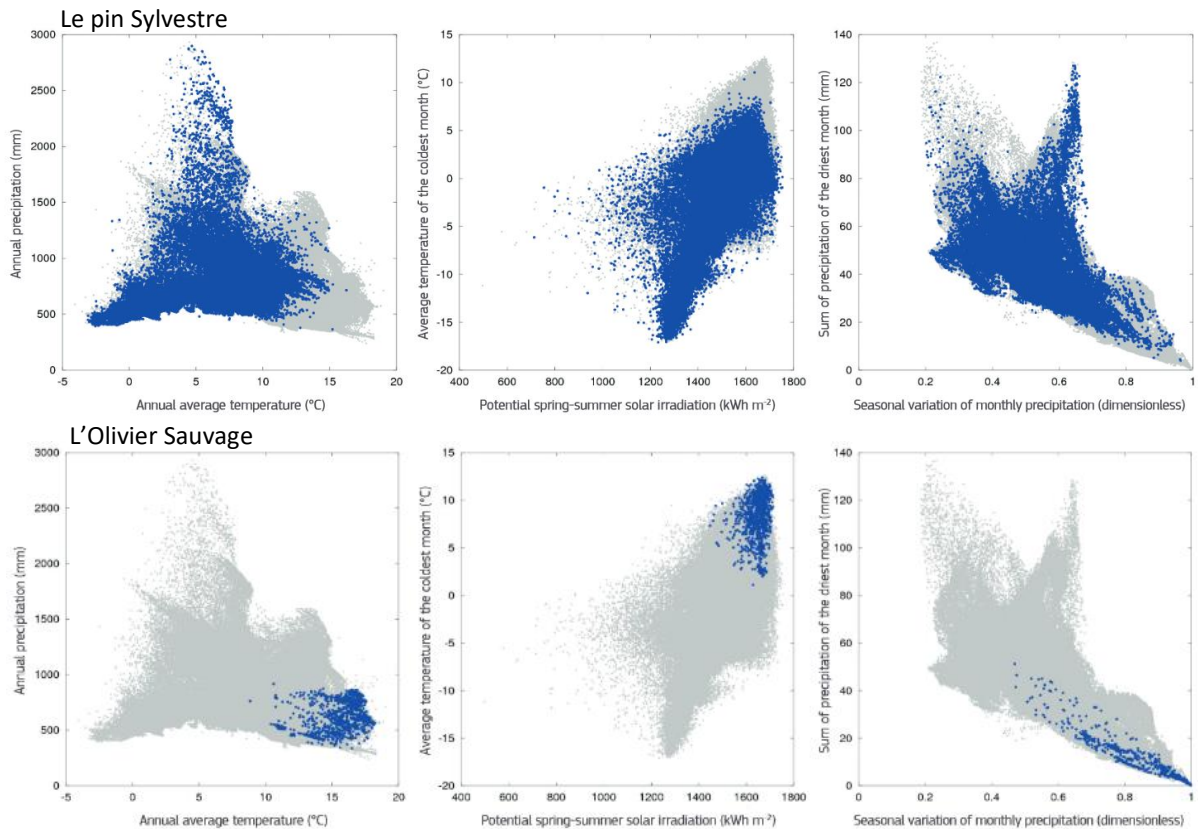
L'étape de modélisation ici présentée est une forme de valorisation des travaux passés. Elle a bénéficié d'un climat de confiance et de bienveillance entre chercheurs pas si évident. Cependant, cette action pâtissait d'une urgence, le programme n'étant à mon arrivée annoncé comme non renouvelé. Il s'agissait d'envisager de formaliser sous forme de modèle le lien entre travaux archéologiques et paléoenvironnementaux. Le principe de MASSTABA, décrit plus loin au §5, implique de commencer la construction du modèle par le fonctionnement biophysique ce qui est l'étape actuellement atteinte. La même trame que les modèles PASHAMAMA et OBRESOC a ainsi été envisagée, avec l'utilisation de la plateforme GAMA et l'inclusion des réseaux hydriques et du décor géographique (Houssou, 2016 ; Houssou et al. 2019). Avec Julien Azuara et Odile Peyron, nous nous sommes dès lors penchés sur une amélioration de la reconstitution de la couverture végétale, au-delà d'un simple indice de biomasse végétale : on pourra ainsi valoriser les données de végétation disponibles puisque celles-ci pourront à la fois servir directement de test en termes de composition des espèces mais aussi indirectement comme conséquence de l'occupation humaine une fois introduit cette dernière. L'idée était de créer un module de végétation intemporel (qui ne soit pas « forcé » par une datation pour tel site) et qui fonctionne de manière autonome, produit de l'inertie environnementale et des évolutions des sols et du climat.

Dans la littérature, les premières reconstitutions de la couverture végétale passée partaient de la donnée pollinique et les Plant Functional Types (PFTs) étaient donc le regroupement des espèces selon leur comportement au temps de conservation autrement appelée taphonomie palynologique (Prentice et al. 1996 ; Barboni et al. 2004 ; Harrison et al. 2010). Ainsi, par exemple, le projet BIOME 6000 (Prentice & Webb, 1998) regroupait les taxons en PFTs à partir du pollen tenu compte de la phénologie (« arbres à feuilles caduques » ou « buissons sclérophylles de climat chaud »). Cependant, l'identification des pollens et des charbons est limitée. Souvent, seule la famille est identifiable mais rarement l'espèce. L'interprétation de ce type de données est délicate : la révolution néolithique dans le Languedoc-Roussillon a coïncidé avec une transition vers un climat méditerranéen plus sec. Il est donc difficile de dissocier l'influence de l'homme de celle des changements climatiques (Azuara et al. 2018). Enfin, la méthode d'extrapolation en elle-même pose deux problèmes fondamentaux. Tout d'abord, traduire une donnée localisée en un point en une couverture spatiale implique de faire des hypothèses fortes quant à la validité spatiale et temporelle de la donnée (relation quantité de pollen produite / abondance de l'espèce, distance de dispersion du pollen, conservation du pollen dans le temps etc.). Ensuite, il est impossible de tester la validité du modèle puisque les seules données disponibles ont été utilisées pour sa construction et ne peuvent donc être utilisés pour un test. C'est pourquoi reconstituer la couverture végétale en s'affranchissant des données paléobotaniques pourrait améliorer notre compréhension de l'évolution de la couverture végétale dans le temps.

La méthode des PFTs ici employée (Barboni et al. 2004 ; Diaz et al. 2009 ; Mauri et al. 2015 ; Cahierre, 2019) consiste à regrouper les espèces végétales présentes sur un territoire en groupes-types selon leurs réactions fonctionnellement équivalentes à ces conditions édaphoclimatiques. Un PFT est donc un ensemble d'espèces qui partagent des traits communs et répondent de façon similaire aux facteurs environnementaux. Telle qu'envisagée, et à l'instar de Hickler et al. (2012) et Santini (2014), il s'agit de construire, toujours volontairement grossièrement mais cette fois quantitativement, les écogrammes des différentes espèces, ici les 95 espèces ligneuses, arbres et arbustes, présentes alors en Languedoc-Roussillon telles que reconnues par la palynologie. Ces écogrammes sont constitués à partir de la bibliographie floristique existante (European Atlas, Flore de Rameau, BaseFlor) construite par les forestiers et naturalistes pour la période actuelle, les espèces n'ayant pas évolué sur cette période historique (Figure 31).

M. Cahierre (Master2 Modélisation Environnementale) a d'abord tenté un regroupement en PFTs deux à deux par classification ascendante hiérarchique (CAH) avec critère de Ward. Afin d'améliorer le pourcentage d'inertie expliqué, elle a ensuite proposé un rapprochement deux à deux itératif par la méthode du k-means répété (Harigan & Wong, 1979) pour obtenir initialement 8 puis finalement 10 PFTs phénologiquement sensés (Figure 32). Sur cette base, l'idée est d'introduire ces 10 PFTs sur chacun des 32 000 pixels d'un kilomètre carré du territoire du Languedoc-Roussillon renseignés spatialement (altitude, pH, réseau hydrique, bassins versants, et par pas de temps, pluviométrie et température). La réaction des PFTs aux conditions d'un pas de temps fera croître plus faiblement ou plus fortement que les autres et ainsi, sera rendu automatique et progressif l'adéquation entre biotope et végétation et donc les évolutions de la couverture végétale selon les évolutions édaphoclimatiques. Sur cette couverture végétale pourrait se superposer, à l'instar des autres modèles présentés

précédemment, des modules simulant les implantations humaines et leurs activités (chasse, pêche, cueillette, élevage et agriculture).



(Points gris : stations où l'espèce n'a pas été observée ; points bleus : stations où l'espèce est attestée).

Figure 31. Autoécologie de deux espèces natives du Languedoc-Roussillon, le pin sylvestre et l'olivier sauvage selon 6 facteurs d'après l'European Atlas, la flore de Rameau et Baseflor.

Cependant, la fin du programme MISTRALS PALEOMEX rend caduque cette procédure par étapes. Il semble dès lors difficile de sortir de la quadrature du cercle du financement et du temps nécessaires à toute modélisation.

• Les PFTs:

1. Large spectre: arbres forêt tempérée
2. Large spectre: Arbres pionniers
3. Large spectre: buissons pionniers (saules, genévriers)
4. Restreint: froid, montagnard (sapin, bouleau, if, hêtre, alisier, tilleul)
5. Restreint: chaud: arbres méditerranéens (pins)
6. Restreint: arbres hygrophiles (chêne pédonculé, aulne, bourdaine, saule bl.)
7. Restreint: chaud: buissons thermophiles
8. Restreint: acide, chaud, humide (bruyère...)
9. Très restreint: humide, côté température (bourdaine, nerprun...)
10. Restreint: espèces halophiles de bord de mer

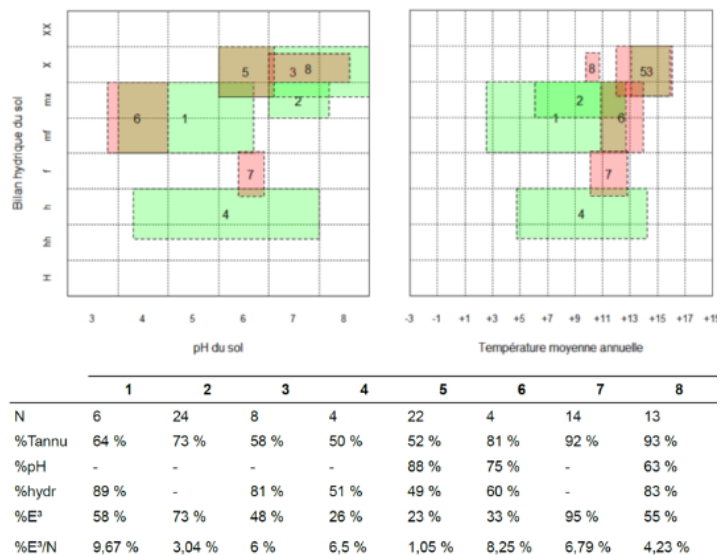


Figure 32. Regroupement en PFTs des 95 espèces ligneuses du Languedoc-Roussillon : Description et espaces des paramètres de survie et de croissance.

3.4.3 Conclusion partielle

Ces différents travaux et les publications qui en ont ou vont en rendre compte ont permis de réfléchir aux aspects épistémologiques et méthodologiques de la modélisation. La communication (Saqalli et al. 2014) puis le chapitre (Saqalli & Baum, 2015) furent ainsi les prémises de l'ouvrage collectif Saqalli & Vander Linden (2019) *Integrating qualitative & social science factors in archaeological modeling. Springer Simulating the Past books Series. Springer Editions, New York, USA*. Cet ouvrage collectif que j'ai dirigé a porté spécifiquement sur l'intégration des aspects qualitatifs et des sciences humaines dans la modélisation des sociétés humaines préhistoriques. Reste à mettre cela en pratique et les contraintes institutionnelles et budgétaires que traverse actuellement la recherche n'encouragent pas ce genre de travail de longue haleine. Ainsi, si je reste convaincu que la démarche KIDS (Keep It Descriptive, Stupid !) permet un meilleur travail collectif, une plus grande réactivité des partenaires thématiques et des résultats plus fructueux d'un point de vue intellectuel, et malgré le fait que chacun des projets menés a permis la constitution de modules nouveaux et potentiellement utiles à d'autres territoires et situations, les aspects pratiques de la recherche suggèrent de s'orienter vers des modèles de type KISS (Keep It Simple, Stupid !). A l'instar de l'économétrie face à la macro-économie, ils permettraient de produire des résultats intéressants et rapidement.

Face à cette tendance, il s'agit dès lors de proposer des perspectives de recherche qui offrent des compromis, combinant une meilleure efficacité de mes travaux, une plus grande interopérabilité et un formalisme méthodologique qui puisse être défendu. Je reste attaché à une construction par briques, chacune valorisable et réutilisable, même si « validée » uniquement et dans un certain cadre par une partie seulement des thématiques de la discipline concernée.

La démarche de réflexion ici racontée a pour origine la difficulté méthodologique de l'appréhension de ces modélisations archéologiques et la prise de conscience des enjeux et de la rapidité de basculement de ces systèmes instables que sont les socio-écosystèmes mais aussi que sont les communautés de recherche interdisciplinaire. Elle m'a poussé à cet effort de mise à plat qui sera décrit dans la suite de ce manuscrit. Ce manuscrit est l'occasion d'étendre cette mise à plat au-delà de la modélisation des SSER passés pour une tentative d'élargissement de la démarche à l'actuel pour espérer ainsi atteindre le « tout temps » et « tout-terrain ». J'en arrive à une réflexion dont je propose ici les résultats dans la §5 qui se retrouve ainsi être la combinaison de cette expérience des SSERs actuels et de cette réflexion sur les SSERs passés. Petit particularisme : ayant apprécié la formalisation en modules indépendants, il me paraît utile par souci de clarté de composer ces éléments de réflexion comme des constituants indépendants certes s'interconnectant. L'abondance de sections à points est ainsi un résultat de cette manière de faire.

Cahierre M., **Saqalli, M.**, Azuara J., Peyron O. 2020. Earth, trees and fire: connecting vegetation and socio-anthropology in French Mediterranean Neolithic modelling. World Archaeological Conference, Prague, Rép. Tchèque, ensuite virtualisée.

Saqalli, M. 2020. "Never go against the family": An enlarged communitary family structure for the Linear Band Ceramic culture hypothesis for explaining longhouses, colonization capacity and collapse. World Archaeological Conference, Prague, Rép. Tchèque, ensuite virtualisée.

Saqalli, M., Cahierre M., Peyron O., Azuara J., Combourieu-Nebout N., Sicre M.-A., Lespez L. 2020. Classification of ligneous vegetation into Plant Functional Types for a dynamic reconstitution of Neolithic vegetation cover in Occitania Mediterranean seashores. EGU General Assembly 2020. EGU2020-5212

Saqalli M., Vander Linden M. 2019. Integrating qualitative and social science factors in archaeological modelling. Springer Simulating the Past books Series. Springer Editions, New York, USA.

Dont Vander Linden M., **Saqalli M.** Chap. 1: Introducing qualitative and social science factors in archaeological modelling: necessity and relevance.

Dont **Saqalli M.**, Saenz M., Belem M., Lespez L., Thiriot S. Chap. 2: *O tempora O mores*. Building an epistemological procedure for modeling the socio-anthropological factors of rural Neolithic socio-ecological systems: Stakes, choices, hypotheses and constraints.

Saqalli M., Vander Linden M. Chap. 11: Trowels, processors and misunderstandings: concluding thoughts. In: Integrating qualitative and social science factors

Saqalli M., Ali Moussa T., Peyron O., Sabatier P., Combourieu-Nebout N., Dezileau L., Bassetti M.-A., Vannièrè B., Sicre M.-A., Carozza L., Carozza J.-M., Lespez L. 2017. Land, rain and sweat: Building a database of what we need for building a temporally dynamic and a spatially explicit agent-based model of Neolithic occupation in Languedoc-Roussillon. Conférence MISTRALS PAELOMEX 16-18/10/2017, Montpellier, France.

Lespez L., Bassetti M.-A., Berger J.-F., Carozza J.-M., Carozza L., Combourieu-Nebout N., Dezileau L., Glais A., Ghilardi M., Kuzucuoglu C., Peyron O., Sabatier P., **Saqalli M.**, Vannièrè B., Sicre M.-A., Jalali B. & Paleomex team. 2017. Climate Change

and social transformations in the past (12ka BP): from field data acquisition towards socio-ecological modeling. Conférence MISTRALS PAELOMEX 16-18/10/2017, Montpellier, France

Saqalli M., Baum T. 2015. Pathways for scale reconciliation: Building ecological socio-modelling methodologies for a reconstitution of human past dynamics over a landscape. In: Chap. 8. Barceló J. A., Del Castillo F. (eds.) *Simulating prehistoric and ancient worlds*. Springer Computational Social Sciences. 233-255.

Salavert A., Bréhard S., Bendrey R., Baly I., Duval J., Renard M., **Saqalli M.**, Dubouloz J., Tresset A., Vigne J.-D. 2015. Cultivation and animal husbandry during the LBK, from the household to the macro-regional scales. In: Bocquet-Appel J.-P., Moussa R. (eds.) Springer.

Saqalli M. 2015. Simple is beautiful? Building a simple climate model for modelling archaeological issues. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère 01/2015, Toulouse, France

Saqalli M., Salavert A., Bréhard S., Bendrey R., Vigne J.-D., Tresset A. 2014. Revisiting and modelling the woodland farming system of the early Neolithic Linear Pottery Culture (LBK), 5600–4900 B.C. *Vegetation History and Archaeobotany* 23, 1: 37-50.

Saqalli M., Kaplan J.O., Baum T., Lemmen C. 2014. Reconstituting human past dynamics over a landscape: pleading for the co-integration of both microvillage-level modelling and macro-level ecological socio-modelling. SSC'14 Social Simulation Conference European. SPUHH: Simulating the Past to Understand Human History, Barcelona, Spain, 04/09/2014.

Saqalli M. 2014. Sociétés rurales du passé : Approche par la Modélisation multi-agents. Séminaire Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249 CNRS Université de Franche-Comté, Besançon, 11/02/2014

Bocquet-Appel J.-P., **Saqalli M.**, Dubouloz J., Berger J.-F., Vigne J.-D., Tresset A., Schwartz D., Salavert A., Ertlen D., Gauvry Y., Ortu E., Sanchez Goñi M.-F., Finsinger W., Dormoy I., Demoule J.-P., Carcaillet C., O'Connor M. 2012. Multi-agent simulations of the trajectory of the LBK Neolithic. Conf. Early Farmers: the view from Archaeology and Science, Uty of Cardiff, UK, 05/2012.

Saqalli M., Salavert A., Bréhard S., Bendrey R., Dubouloz J., Bocquet-Appel J.-P., Vigne J.-D., Tresset A. 2012. Contribution of archaeozoology and archaeobotany to a multi-agent system mimicking the LBK society (Central Europe, 6th-5th millennia BC). Conf. Early Farmers: the view from Archaeology & Science, Uty of Cardiff, UK, 05/2012.

Saqalli M., Salavert A., Ertlen D., Moussa R., Bocquet-Appel J.-P. 2012. Permanent vs. shifting cultivation: the farming system of Neolithic LBK (7800-6900 BP). 3rd Inter-national Schöntal Conference Farming in the Forest Ecology & Economy of Fire in Prehistoric Agriculture, Klöster Schöntal, Allemagne 07/2012.

Saqalli M., Salavert A., Ertlen D., Moussa R., Bocquet-Appel J.-P. 2012. Modeling a typical LBK hamlet functioning at the household level. 3rd International Schöntal Conference Farming in the Forest Ecology & Economy of Fire in Prehistoric Agriculture, Klöster Schöntal, Allemagne 07/2012.

4 Résultats scientifiques : Modéliser des systèmes socio-écologiques ruraux

4.1 Comprendre : Socio-anthropologie et démarches quantitatives

4.1.1 Introduction partielle

Les sciences sociales incontournables

Seuls facteurs explicatifs de la principale force de transformation actuelle de la biosphère

Comme suggéré en introduction, le terme « anthropocène » est d'abord un coup marketing : il est une manière de faire apparaître au grand public que l'influence de l'Homme est devenue massive, géologique, que sa trace restera visible dans les temps géologiques futurs. La notion de 6^{ème} extinction est apparue en même temps pour faire apparaître l'incongruité et l'énormité de la catastrophe écologique qu'est notre espèce. Ce terme, destiné au grand public n'a pas modifié les poids respectifs, en particulier en termes de financements, des disciplines touchant aux socio-écosystèmes³¹. Pourtant, s'il faut se répéter, si la force principale ici était les volcans, on étudierait les origines des volcans, les facteurs affectant les puissances et les impacts des différents types de volcans. L'origine de cet écart tient à de nombreuses raisons qui tiennent plus de la sociologie des organisations (Crozier & Friedberg, 1977) et au lien à l'économie. Comme dit en introduction, la notion de modélisation, conceptuelle puis informatique, renvoie à l'idée d'approcher la vérité, ici dans ce cas d'un SSER. Ne pas intégrer le plus gros facteur de transformation serait un non-sens et ne pas intégrer les sciences sociales qui meuvent celui-ci l'est aussi. Mais surtout, ne pas mettre la majorité des moyens sur cet aspect est statistiquement faire une plus grosse erreur prospective, ce qui s'oppose aux approches cumulatives qui tendent à envisager le rajout de la société humaine comme la cerise sur le gâteau d'un bel écosystème modélisé.

L'élaboration de modèles socio-écologiques, pour des situations passées et présentes, repose sur la sélection de variables pertinentes. La traduction de données quantitatives en règles de comportement des composants est relativement facile : cela est généralement réalisé en calculant les valeurs moyennes ou médianes, et les écarts par rapport aux divers ensembles de données existants, qui sont ensuite utilisés pour fixer les paramètres et/ou les règles dans les modèles. Les critères appliqués pour le choix des variables pertinentes sont souvent moins explicites. Cela est bien illustré dans les modèles où les variables environnementales sont souvent privilégiées. Pourtant, de nombreuses études indiquent que les variables anthropologiques (par exemple l'organisation familiale, les règles de succession, la répartition du pouvoir entre les lignées ou les familles) peuvent avoir un impact considérable sur l'environnement, parfois de manière contre-intuitive (voir par exemple Rouchier et Resquiers-Desjardins, 2000 ; Polhill et al. 2010 ; Saqalli et al. 2010). Plus généralement, la traduction des traits qualitatifs reste à régler. Par conséquent, est ici soulevée la question plus générale de l'inclusion et de la prise en compte de variables qualitatives dans les modèles, et, au-delà, de la validation scientifique de ces modèles.

Facteurs de cohérence à la culture en plus de la nature

Les agriculteurs et autres utilisateurs des ressources naturelles sont rationnels. Rationnel signifie qu'ils sont d'une part logiques donc cohérents dans leur fonctionnement, et d'autre part ancrés dans la réalité (Sapir, 2013). Rappelons que cette rationalité peut être limitée et surtout qu'elle ne s'étend pas à la société correspondante mais aux personnes et aux choses dont il/elle a la responsabilité : l'intérêt individuel n'est pas l'intérêt collectif et celui-ci n'est pas le produit des intérêts individuels³². Ils sont cependant pluri-rationnels selon plusieurs champs thématiques, qui s'emboîtent : ainsi, une agricultrice souhaiterait éventuellement obtenir une belle récolte (rationalité agricole) mais n'obèrera pas ses finances pour acheter des produits couteux et

³¹<https://anr.fr/fr/actualites-de-lanr/details/news/resultats-de-lappel-a-projets-generique-2019-1157-projets-de-recherche-finances/>

³² Axiome que Mrs Mazoyer et Dufumier, professeurs à AgroParisTech, répétaient avec raison : « les gens ont de bonnes raisons de faire ce qu'ils font. Si vous les trouvez incohérents, c'est que vous n'avez pas assez travaillé ».

éventuellement risqués, suspendra éventuellement ces projets lors de moments festifs et laissera tout tomber si un proche est malade, comme tout un chacun. Cette rationalité procédurale pour reprendre Herbert Simon explique les changements de comportements dans le temps.

Elle explique aussi la cohérence partielle de l'individu dans sa relation au territoire : plus un agriculteur/trice dépend pour sa vie des liens au territoire, plus celui-ci fera l'effet de gestion. On comprend dès lors l'intérêt de se pencher sur les interdépendances entre territoire et acteurs transformant ce territoire. Mais saisir la cohérence d'une famille ou d'un individu implique d'intégrer aussi ses liens sociaux et familiaux.

À titre d'illustration simple, considérons par exemple les sociétés rurales où la densité démographique est faible et où l'accès à tout bien (nourriture, eau, logement, etc.) dépend principalement de la main-d'œuvre. L'accès à la main-d'œuvre dans une famille est défini par les mariages, la démographie, l'organisation familiale, l'organisation et les règles extra-familiales, l'accès différentiel aux activités de production et autres, sans oublier l'importance des réseaux sociaux. En bref, les conditions de vie et même de survie d'une personne dépendent des règles sociales et de la morphologie de son environnement social et de la culture qui lui est associée et cela ne peut se voir directement sur une image satellite (Lemieux, 1976 ; Collier et al. 2009 ; Amblard et al. 2010 ; Filho et al. 2011 ; Neumann et al. 2011 ; Gabbriellini, 2014 ; Neumann et Lotzmann, 2016 ; Thiriot, 2018). Par conséquent, voilà une variable cruciale qu'il va falloir « recréer ». En termes pratiques, si une famille équatorienne a besoin du soutien de la communauté pour faire une chakra (un jardin potager), cela crée un sentiment de communauté mais quid de la relation privilégiée qui risque ainsi d'être dévoilée, du père avec un chef d'équipe pétrolier, qui promet de l'embaucher, lui d'abord, lors de la prochaine vague de petits contrats de manouvriers? Cet exemple, observé, illustre cette intrication bien normale qui va ainsi expliquer formellement la non-évidence de la relation de l'acteur humain au territoire : d'autres éléments sont en jeu et ils ne peuvent pas être négligés. Ils peuvent cependant, comme le reste, être simplifiés.

Des facteurs pouvant être négligés ?

Mais quelle est la force de cette influence ? Ces variables ne seraient-elles pas, en général, insuffisamment déterminantes pour ne pas valoir la peine qu'elles soient prises en compte dans les modèles socio-écologiques ? Suggérer des causalités entre dynamique sociale et spatiale passe-t-il le test de la réfutation, comme a pu être réfutées le déterminisme environnemental strict sur des sociétés passées ?

Certes, en raisonnant par l'absurde, des modèles décrivant des écosystèmes anthropisés sans intégrer de dimension sociale (et il en existe) reviennent à considérer l'homme comme une force extérieure au système observé, à l'instar des sols ou du climat, dont le comportement n'a pas à être expliqué mais mimé. L'homme reste alors une boîte noire. Il n'est donc pas une composante de l'objet de recherche mais en est une variable extérieure : c'est bien le territoire, l'écosystème qu'on regarde et les (très) nombreux projets de modélisation annonçant un regard sur les socio-écosystèmes sont le plus souvent des modèles de territoires. Et ces modèles, dès lors, ne peuvent pas avoir une portée temporelle au-delà de 4 à 5 années car au-delà et plus on s'approche de la génération, plus les facteurs anthropologiques et économiques conditionnant la transmission des biens comme des valeurs et des croyances vont jouer. Par exemple, une société avec un système d'héritage à un seul héritier dans un contexte de pénurie de terres ou avec une différenciation selon le sexe induit une stratification sociale forte et auto-amplifiante sans besoin d'une autre dynamique. Bref, des modèles de SSER en négligeant l'homme peuvent fonctionner mais sont valides sur moins longtemps.

Sociétés rurales de front pionnier, pour une meilleure approximation

Comme dit en introduction de ce manuscrit, les systèmes écologiques répondent aux « lois de la nature », immuables et uniformes dans l'espace, au moins dans l'intervalle historique du Néolithique à nos jours : les espèces n'ont pas forcément évolué et les mêmes conditions du biotope définiront le fonctionnement de la biocénose et par là de la biosphère. Étudier les systèmes écologiques sans action de sociétés humaines a une portée plus « universelle » : les contraintes, conditionnalités et dynamiques peuvent être considérées pour d'autres territoires que celui étudié. Bref, des modèles de SSER où il n'y aurait pas l'homme fonctionnent mieux et plus loin. Mais l'homme est partout et les écosystèmes non anthropisés sont maintenant quasi-disparus.

De l'autre côté, les sociétés urbaines ou les sociétés agro-industrielles dont les rationalités ne dépendent pas directement des dynamiques environnementales locales, ont un éventail de trajectoires bien plus difficile à

circonscrire dans une approche formelle de modélisation. Les sociétés rurales dépendantes pour leur pérennisation des activités liées aux ressources naturelles : agriculture, élevage, chasse, pêche, cueillette, conditionnées par les systèmes écologiques, agronomiques, techniques et économiques (au sens d'économie des ressources) de la production des systèmes agraires, sont plus faciles. Plus précisément, il est moins hasardeux d'étudier des sociétés rurales que des sociétés urbaines.

Comme dit également précédemment, c'est dans le temps que le rôle de la société devient fondamental et que l'on voit que ces facteurs ne peuvent être négligés. Or, les modèles nécessitent de commencer quelque part : il faut un t₀, un moment où commence le modèle dans le temps comme il faut le situer dans l'espace par une carte. Mais les SSER depuis longtemps anthropisés et transformés ont des t₀ très anciens : En Mélanésie jusque -12000 BP³³ ; Syrie jusque -11000 BP. Doit-on remonter jusque-là ? Si l'on commence la simulation plus tard, qu'est ce qui est de l'écosystème et qu'est-ce qui est de la transformation de l'écosystème ? Redisons le bien : tous les écosystèmes ont été transformés et même ceux apparemment les moins affectés, comme la forêt amazonienne, sont des faux écosystèmes naturels et s'apparenteraient plus à une futaie jardinée. Marquer un t₀ à une date plus récente n'est pas signifier qu'il n'y avait rien avant mais que cet « avant » est interprétable comme le produit d'un socio-écosystème passé et d'une pression anthropique alors faible à t₀ (par exemple chasse et cueillette par des groupes de faible taille assimilables en termes de pression écologique à des super-prédateurs). Cela n'implique pas non plus une quelconque harmonie idéalisée de la nature.

Mais ce sont des systèmes plus facilement abordables. Ainsi, on notera que les sociobiomes abordés dans les trois parties précédentes pourraient être assimilables à la notion de front pionnier actuel (avec les précautions de langage et de concept précisé plus haut) :

1. L'espace sahélien a vécu des temps de grande densité démographique. Raynaut et al. (1997) décrivent assez formellement le lien en cascade reliant forte densité démographique, capacité à se défendre des raids esclavagistes, des guerres et de se maintenir en structures politiques, et maintien ainsi de la densité démographique : les noyaux de population du début du 20^{ème} siècle sont les noyaux politiques survivants des siècles sombres post-effondrement des grands empires. En termes d'emprise et de densité, cet effondrement passé a impliqué une diminution d'au moins la moitié de la population sur cet espace de l'intérieur du Sénégal au Tchad. La reconquête de son propre espace dès la fin de l'ère des razzias, entre 1920 et 1940, s'est faite d'abord par une métamérisation de hameaux colonisant les espaces interstitiels puis seulement après 1950, par une inflation démographique explosive, qui continue de nos jours. Cette conquête est ici assimilable à un « front pionnier » intérieur, sur un espace certes connu mais alors en accès libre et pas en commun ;
2. L'Amazonie Equatorienne comme guyanaise a une histoire moins connue mais les travaux des deux dernières décennies ont définitivement enterré la notion de front pionnier en forêt vierge au profit d'une colonisation d'un espace ré-enforesté, produit d'une part d'un abandon catastrophique par plusieurs civilisations précolombiennes amazoniennes à la densité démographique non négligeable ayant transformé le paysage mais aussi les sols (pratique de la Terra Preta : Valdez, 2018) et d'une micro-sélection des espèces forestières durant et après cette période. Mais l'arrivée massive de colons, la disparition du couvert forestier, la translation des rationalités agricoles vers une part de cultures de rente dominante (et par conséquent une exportation de carbone massive sur des sols pourtant fragiles et lessivés) et la simple explosion de la densité démographique sont des ruptures majeures. Cette colonisation/infiltration est, je pense, également assimilable à un « front pionnier », sur un espace à la fois en accès libre et inconnu pour certains, et un commun bien connu pour d'autres ;
3. Le Néolithique devrait être le front pionnier par excellence. Le long et tumultueux débat entre évolutionnisme (les innovations apparaissent d'abord localement), diffusionnisme (l'information sur l'agriculture est transmise par échange culturel) et expansionnisme a été tranché pour ce qui est de l'Europe au profit de cette dernière hypothèse : il s'agit bien de peuples qui se sont progressivement étendu et ont colonisé sur plusieurs millénaires des espaces uniquement occupés par des chasseurs cueilleurs paléolithiques. Certes, l'impact de ceux-ci sur plusieurs dizaines de millénaires a dépassé le statut de simple super-prédateur qu'on

³³ *Before Present*

pourrait leur affubler quand on voit la disparition de la mégafaune sur tous les continents (sauf l'Afrique). Cette colonisation est ce qui serait le plus proche de la notion de « front pionnier », sur un espace en accès libre et inconnu ;

Le choix initial de travailler sur les forêts impliquait bien cette idée de t0. Je pourrais donc redéfinir mon approche à une modélisation des SSERs pionniers (avec toutes les précautions d'usage qui s'imposent). L'orientation progressive d'une partie de mes travaux vers la Méditerranée questionnera la capacité de ces approches. La suite de ce manuscrit essaie ainsi de présenter une démarche qui fonctionnerait pour ces trois « fronts pionniers » et au-delà dans un futur à élaborer :

Modéliser des paysans, c'est pratique mais peu apprécié

Les premières utilisations de la modélisation et des simulations informatiques pour l'analyse des systèmes socio-écologiques passés et présents remontent aux années 1960 et 1970. Elles sont liées à la fois aux concepts informatiques développés alors puis aux nouvelles technologies de traitement et de calcul. Les raisons de cette résurgence sont multiples, et la disponibilité croissante de matériel informatique de moins en moins cher et de plus en plus puissant ne doit pas être sous-estimée dans ce processus (Lake, 2014 ; Grosman, 2016).

Elles ont aussi été rendues possibles du fait de la diffusion des paradigmes d'analyse des systèmes, en particulier écologiques puis socio-écologiques : rappelons-nous du choc du premier rapport Meadows (Meadows et al. 1972 ; Kieken & Mermet, 2005) qui, tout simple qu'il fût, reste valable aujourd'hui pour notre plus grande inquiétude. Le développement de ces modèles, leur formalisme ont contribué de manière spectaculaire à remodeler la compréhension des systèmes socio-écologiques et de donner une traduction concrète de l'approche holistique et systémique tant souhaitée par de Rosnay (2014) ou Latour (2017). Alors que la reconnaissance du rôle de la modélisation informatique a connu des fluctuations majeures, parallèlement à des dissensions majeures au sein de la communauté de modélisation socio-environnementale, l'utilisation des modèles informatiques a connu une croissance exponentielle au cours des deux dernières décennies.

D'un point de vue théorique et méthodologique, les approches de modélisation permettent d'articuler de manière formelle des variables nombreuses et diverses (Shennan et Steele, 2005 ; Kohler et Gumerman, 2000 ; Kohler et van der Leeuw, 2007) et, en particulier dans le cas des modèles basés sur des agents, d'explorer leurs interactions complexes de manière non déterministe (Cegielski et Roberts, 2016). Dans cette perspective, il convient de noter que les modèles informatiques ne diffèrent pas des modèles dits littéraires, largement utilisés par les chercheurs socio-environnementaux "traditionnels", au sens de "descriptions verbales d'un ensemble proposé de relations causales" (Steele et Shennan, 2009, p. 108).

Ainsi, au regard de cette apparente proximité, pourquoi la modélisation informatique reste-t-elle une activité de niche et spécialisée ? Par exemple, en archéologie, Lake n'a pu compter que 70 études de simulation ayant été publiées entre 2001 et 2014, sans compter les études purement conceptuelles et les duplications du même modèle (Lake 2014). Plus précisément, la modélisation non assumée est dominante quand la modélisation assumée est accessoire. Conceptualiser en passant, oui, le faire sciemment, non. On peut utiliser comme contre-exemple de réussite d'hybridation des SIGs, et plus précisément leur intrication progressive avec les études de géographie pour former une seule discipline, induisant une dynamique en conséquence dans les disciplines liées géographiquement comme la géologie, la géomorphologie ou la pédologie, qui ne pourraient s'envisager aujourd'hui sans le recours à la formalisation SIG. La même imprégnation se produit entre biologie et disciplines connexes d'une part (épidémiologie, médecine, biochimie, ...) et les statistiques informatisées d'autre part.

Alors quoi ? Certes, comme la modélisation est aussi une question de pratique pour appréhender des concepts peu évidents et acquérir des compétences connexes, de nombreux chercheurs en sciences sociales sont confrontés à des difficultés en termes d'utilisation et de codage informatique. Si l'on peut dire que c'est souvent le cas, il existe des stratégies alternatives efficaces pour formaliser l'interdisciplinarité qui y est liée (Etienne et al. 2011) et, dans de nombreux cas, la modélisation informatique sur les SSER est le résultat de projets interdisciplinaires productifs, bien que complexes. Des questions plus fondamentales et des malentendus sur le processus de modélisation, profondément ancrés dans les représentations théoriques et épistémologiques intra-disciplinaires, expliquent la réticence de l'engagement envers les modèles informatiques.

Une remarque supplémentaire s'impose. Dans le cadre de ce manuscrit, notre attention est principalement consacrée à un aspect particulier des modèles, à savoir les modèles basés sur les agents, ou multi-agents (Cegielski et Rogers 2016). Il faut souligner que cette catégorie particulière de modèles n'est pas, de loin, la seule utilisée sur les systèmes socio-écologiques puisque, par exemple, les modèles mathématiques (comme par exemple réaction-diffusion, proies prédateurs, épidémiologie sont très populaires : Steele, 2009). Les questions abordées ici s'appliquent en fait à toutes les formes de modélisation, bien qu'elles soient peut-être plus aiguës lorsqu'elles sont considérées du point de vue des modèles basés sur les agents.

Variables, données et informations, critères et paramètres, seuils et indicateurs

Je souhaiterais au préalable définir certains termes employés et d'usage courant dans le contexte de la modélisation et qu'il parait nécessaire de différencier ici. En particulier, je souhaiterais par avance éliminer le terme facteur, utilisé au sens large et pour tout élément exerçant une influence dans le regard sur un problème et pas mieux défini.

Variables : les variables sont les caractéristiques d'un élément constitutif d'un système socio-écologique, par exemple les humains, le bétail, les sols, le climat etc. qui chacun doivent être caractérisés, i.e. décrits selon un nombre suffisant (si manquante, l'élément n'est pas assez décrit pour être compréhensible) et nécessaire (l'ensemble des variables caractérisant cet élément suffit à rendre compte de son fonctionnement et de son impact) de caractéristiques. Une variable est donc une caractéristique discriminante, dans le temps, dans l'espace ou les deux de cet élément constitutif et il faut donc aller chercher des données ou des informations qui vont la décrire selon la dimension considérée, temps et/ou espace, de manière exhaustive (toute la dimension est renseignée) et harmonisée (la donnée ou l'information est décrite de manière uniforme sur la dimension en question). Ces trois attributs de la variable (discrimination, nécessité et suffisance) impliquent que la variable soit définie sans chercher à savoir si la donnée ou l'information correspondante est disponible.

Données et informations : je reprends la classification de Bommel (2009)³⁴: l'information caractérisant un élément du SSER est issue du terrain et reste à être traduite soit sous forme de règle construite et ad hoc pour le système soit sous forme de variable qui doit être décrite par des données, c'est-à-dire des informations catégorisées selon les composantes de la dimension discriminante (pixels, pas de temps). Ces données peuvent être quantifiées ou qualifiées (par exemple une carte indiquant des groupes ethniques). Ainsi, dans l'ontologie que constitue le tableau attributaire d'un SIG, les champs attributaires sont des variables, les valeurs d'attribut sont des données et la liste des valeurs possibles, avant qu'elles soient placées, sont des informations.

Critères et paramètres : Je définis comme critère les éléments permettant de sélectionner ou éliminer des variables dans un modèle. Ce ne sont pas ses caractéristiques mais les éléments de choix. De même que Bommel (2020), j'adhère à la représentation constructiviste du monde³⁵. Mais ces légitimités plurielles ne sont pas forcément un frein à la vérité du monde si on accepte que celle-ci soit le produit d'un consensus social qui, lui seul, s'expose petit à petit à la réalité du monde par les contestations et les infirmations. Par conséquent, pour chaque variable, sa définition puis sa sélection pour la reconstitution du SSER dans une modélisation conceptuelle puis informatique, est régie par un consensus qu'il s'agira de rendre le plus valide possible. L'emploi de critères est ainsi une formalisation des éléments constitutifs de ce consensus. Ainsi, par exemple pour le projet PALEOMEX, c'est par analyse de la bibliographie et par le produit d'une réunion des spécialistes du domaine sur le territoire du Languedoc-Roussillon que seront sélectionnées les variables pH, Bilan Hydrique et température

³⁴ Bommel P. 2009. *Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles Multi-Agent adaptée à la gestion des ressources renouvelables* (Thèse en Informatique). Université Montpellier II Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, France.

³⁵ « Le sens commun véhicule l'idée que notre perception du monde est donnée par la nature des choses. Mais avec Piaget (1968) cité par Harlow et al. (2008), les constructivistes estiment que les représentations de chacun [...] sont une reconstruction de la réalité. [...] l'impression d'évidence procède plutôt d'une construction cognitive et implicite de la part de l'observateur. La compréhension, constamment renouvelée, s'élabore à partir de représentations plus anciennes qui sont restructurées, en interne, au fur et à mesure des informations reçues. Ces constructions sont à la fois issues et constitutives du système de représentation propre à la culture à laquelle appartient l'acteur (Friedberg, 1992, cité dans Bousquet et al. 2009).

par le fait qu'ils se retrouvent comme recensés dans tous les articles recensés décrivant le comportement des espèces ligneuses sur ce territoire. Le critère doit donc être dit posé et discuté : il s'agissait bien non seulement de l'occurrence de présence de ces variables mais plus encore leur occurrence continue. Les paramètres sont paradoxalement plus simples : ils sont les mises en application des variables choisies et se traduisent dans chaque itération « atomique » de la dimension considérée (le pas de temps pour le temps, le pixel pour l'espace, l'individu ou la famille pour le social) par une valeur rapportée du terrain ou générée, la donnée. Ainsi, la température est la variable qui se traduit par son avatar établi par consensus comme le plus signifiant, initialement la température du mois le plus froid changé pour la température annuelle, qui est ici le paramètre. Pour un pixel donné et pour un pas de temps donné, la valeur sera disons de 13°C, une valeur issue de données (dans une simulation sur l'actuel) ou générée par reconstitution.

Un indicateur est une formulation dynamique établie dans la perspective d'illustrer un ou plusieurs aspects abordés par un ou plusieurs thèmes. Ils doivent permettre d'illustrer une dynamique et permettent aux chercheurs, évaluateurs et « preneurs de décision » (agents de service publics, élus, responsables associatifs et politiques, etc.) de donner du sens aux représentations et modèles qu'ils adoptent. Ils sont donc à différencier de variables motrices des dynamiques en question : ainsi : le niveau des nappes mesurés via des puits et des forages n'est bien évidemment pas le moteur des variations des pluies. Il rend compte de la conséquence de cette variation des pluies. De même et plus subtilement, la pluviométrie mesurée en mm n'est qu'un indicateur, la variable motrice étant l'eau tombée par unité de surface. J'introduis cependant un critère supplémentaire différenciant indicateur et mesure : la mesure est bien le nombre de mm tombés ou la hauteur de la nappe. Un indicateur serait l'écart de cette pluviométrie ou de cette hauteur de nappe par rapport à une situation de référence ou à un usage : Un indicateur rend compte d'un état relatif et devient parlant pour une personne extérieure à une situation environnementale donnée lorsqu'une mesure n'est utilisable que pour l'expert. Il existe différentes approches pour la construction et l'adoption d'indicateurs. Les critères de pertinence suivants peuvent être adoptés et étoffés pour évaluer un indicateur et je considère cette liste comme également valables pour estimer la qualité d'une donnée. Je les liste selon l'acronyme EGI PER PRECIUM³⁶ (« j'ai agi selon chaque valeur » en mauvais latin) (Tableau 8) :

Tableau 8. Critères de qualité de l'indicateur ou de la donnée.

Utilité communicationnelle et sociale de l'indicateur ou de la donnée		
E	✓	Explicatif/Parlant (Ex : les 2°C du changement climatique)
G	✓	Généricité : Est-il constructible à partir de différents outils de mesure et donc applicable en divers milieux/écosystèmes/zones d'enquête ?
I	✓	Illustratif en termes de tendances
Sensibilité/Robustesse de l'indicateur ou de la donnée		
P	✓	Pérennité de la source de mesure
E	✓	Evaluation des déterminants de la sensibilité d'un indicateur
R	✓	Robustesse de la mesure face à la variabilité et à la marge d'erreur
Efficacité de l'indicateur ou de la donnée		
P	✓	Précision : La maille spatiale (l'échelle), temporelle (le rythme de la mesure) ou socio-économique (l'unité d'enquête) qu'elle mesure est-elle la meilleure ?
R	✓	Réificabilité : Est-il quantifiable ? modélisable ?
E	✓	Exactitude : Intègre-t-il bien la complexité des éléments étudiés et les variables négligées dans son utilisation sont-elles bien négligeables ?
C	✓	Couverture : Couvre-t-il tout le territoire, toute la période envisagée ?
I	✓	Intégratif et objet d'un consensus au sein de la communauté
U	✓	Utile : Permet-il de couvrir simplement un grand domaine de dynamiques ?
M	✓	Mesurabilité : En termes pratiques, en quoi sa mesure est-elle plus aisée ?

³⁶ EGI PER PRECIUM : initialement un premier recensement de Saqalli et al. (2018) et se retrouve chez Pipino et al. (2002) ou Batini et al. (2009).

4.1.2 Contraintes à l'articulation des disciplines en modélisation quali-quantitative des SSERs

La modélisation : Jamais prêt

« Nous n'avons pas assez de données à ce sujet ». C'est la réponse courante qu'un modélisateur peut entendre lorsqu'il est question de formaliser et d'assumer des hypothèses chiffrées sur le fonctionnement d'un SSER. La réponse la plus fréquente dudit modélisateur serait alors "certes, mais alors ? Nous pouvons faire quelque chose de laid, de flou et de peu précis, mais il est clair que l'erreur serait moindre que de ne pas intégrer le processus considéré dans le modèle en raison du manque de données, ne pensez-vous pas ?" Plus encore, l'affirmation "pas assez de données" est théoriquement toujours valable : quel que soit le problème, les données manqueront. Où placer la limite au-delà de laquelle on peut affirmer être en droit de combiner les dynamiques et construire un modèle de la réalité pour répondre à une question ?

Plus généralement, notre objectif dans cette section est de faire valoir que nombre de contre-arguments à la modélisation sociale, tous apparemment valables et contextualisés, reviennent à questionner la pertinence même d'une modélisation qui soit explicite. Ainsi, la question "comment pouvons-nous modéliser sans toutes les informations nécessaires ?" signifie en fait "comment pouvons-nous modéliser ?".

On peut considérer que la modélisation est le dernier avatar de la seconde partie de la recherche, moins connue, moins visible et valorisante : la construction et la création de théories à partir de données et d'informations que les scientifiques ont préalablement recueillies. Cette démarche (ou modalité d'inférence), souvent appelée "inductive" dans l'approche de recherche hypothético-déductive la plus acceptée (déduction vs. induction vs. abduction) (Bleic & Cecchini, 2008, p. 539-540), implique de combiner ensemble des "éléments", des morceaux de science, selon un plan qui peut éclairer une question. Cela a pu être évalué dans le passé selon un processus intuitif, tel que décrit par Bergson (1911) : il décrit cette capacité de relier des processus, des modèles et des dynamiques selon des analogies, des comparaisons et des cohérences comme une action purement humaine, impossible à formaliser. De nos jours, les outils de modélisation, en particulier lorsqu'ils sont mis en œuvre pour intégrer des informations et des règles à la fois qualitatives et quantitatives, possèdent cette capacité si et seulement s'ils sont utilisés selon une méthodologie formalisée et épistémologiquement pertinente. Ils peuvent alors être utilisés comme un moyen d'explicitation des relations selon une approche systémique. Je considère qu'elles devraient être utilisées comme un moyen de remplir la deuxième fraction de la recherche : la mise en relation des données par des causalités et pas seulement des corrélations autrement appelée modélisation (la mise en relation entre données serait ici de l'analyse). Ainsi, tous les projets collaboratifs auxquels j'ai pu participer comprenaient une part très majoritaire de collecte et d'analyse (autour de 89% pour OBRESOC et MONOIL).

La modélisation des SSERs : listons les contre-arguments

Je présente ici une liste des éléments caractérisant la posture de la modélisation et ainsi, ce qui la différencie d'une approche analytique, créant ainsi tout autant de clivages apparents mais qui sont autant d'atouts pour un enrichissement :

« *Il faut plus de données dans le modèle* » : revenons rapidement sur ce point : Les variables décrivant un SSER ne doivent pas être déterminés par la disponibilité des données mais au contraire être formalisés au préalable puis testés qualitativement par le "terrain". A titre de contre-exemple absurde, nous avons vu par exemple que des hypothèses de changements environnementaux au Sahel se basaient uniquement sur le changement climatique, négligeant la démographie car les raisonnements étaient construits sur les données disponibles, issues de la télédétection, ne visualisant pas les drivers sociaux. Plus globalement, on peut déplorer la surdétermination de la question de recherche par la disponibilité des données. Cette question doit être construite indépendamment puis ensuite seulement, vient le moment de partir à la recherche des données nécessaires renseignant les variables identifiées. Plus encore, les meilleures données (voir critères sur les données dans le présent document) doivent être conservées comme entrée : elles sont rarement exhaustives, couvrant tout le territoire et toute la période envisagée dans la modélisation mais sont le meilleur reflet de la réalité à reconstituer. Elles sont donc à réserver pour la phase de test et non pas en entrée dans le modèle, ce qui, culturellement et socialement, n'est pas évident à faire passer auprès du créateur de ces données.

« *Vous en faites des robots* » : Pour de nombreux thématiciens, l'approche de modélisation a pour défaut majeur d'être globalisante³⁷ et de vouloir simplifier, ce qui serait l'élément le plus préjudiciable. La perception de ces modèles en est dès lors qu'ils sont mécanistes, intrinsèquement imparfaits et incapables d'englober de quelque façon que ce soit la complexité du passé et des données. En ce sens, c'est vrai et c'est heureux : un modèle n'a pas pour objectif de reconstituer l'univers, mais à l'instar de statistiques sociales ou de mesures physiques dont le côté chiffré ne pose aucun problème, il s'agit de rendre compte d'une situation locale dans sa complexité mais globalement, mimée au mieux pour répondre à une question. Ce reproche n'est paradoxalement pas fait aux modèles statistiques ou économétriques car ceux-ci ont acquis une légitimité qui ne peut plus être contesté. Ainsi, cette remarque, injustifiable en soi, est un indicateur précieux de la faible visibilité et la faible légitimité des formes de modélisation sociospatiale.

Pointillisme contre impressionnisme : Il y a ici une différence simple mais significative dans la définition de la recherche de la vérité : en caricaturant, on peut décrire le thématicien de terrain³⁸ comme une approche pointilliste, avec une série de points de terrain, chacun fournissant des informations limitées mais significatives, conduisant finalement à une interprétation significative par l'accumulation d'un nombre suffisant de points. Les modélisateurs auraient une approche impressionniste, où une image initialement brute, floue mais globale, s'améliorerait au fil d'un processus plus détaillé de la dynamique locale affectant l'ensemble du système. Par conséquent, une partie considère les modèles comme toujours faux et flous, tandis que l'autre partie considère les points comme - presque - inutiles.

Mimer et ne pas reproduire : Alors que plusieurs thématiciens considèrent la simplification comme une menace à la reconnaissance de la complexité inhérente à la vie humaine, les modélisateurs la considèrent au contraire comme une étape nécessaire pour avoir un aperçu de cette même complexité. Dans les deux cas, la complexité n'est donc jamais remise en question, bien que les manières de l'évaluer diffèrent profondément. Les modèles sont avant tout des expériences de pensée que l'on formalise : leur architecture exige un formalisme explicite pour traduire les hypothèses et les causalités suggérées en règles et en code, mais ne peut, comme déjà dit précédemment, prétendre être intellectuellement meilleure que les modèles de pensée. En ce sens, et ne serait-ce que pour des raisons pratiques, la simplification est une étape nécessaire. Au moins dans l'esprit des modélisateurs, les modèles ne visent pas à reproduire la réalité, mais plutôt, au mieux, à encapsuler certaines propriétés de la réalité.

"KISS" vs. "KIDS" : L'étendue et la nature de ces propriétés sont en fait débattues au sein même de la communauté des modélisateurs : certains adoptent une position très abstraite et ont tendance à considérer les modèles comme de pures expériences théoriques et de pensée, une approche qui conduit souvent à des modèles simples visant à explorer une hypothèse et/ou un processus donné. Au contraire, d'autres modélisateurs considèrent que les modèles doivent intégrer un niveau de complexité plus élevé, ce qui entraîne l'ajout de nombreux paramètres et règles. Cette dichotomie quelque peu binaire est souvent considérée comme une opposition entre les modèles dits KISS (Keep It Simple Stupid) et KIDS (Keep It Descriptive Stupid) (Edmonds et Moss, 2005 ; Cegielski et Rogers 2016). Il s'agit de garder à l'esprit la différence entre systèmes physiques et biologiques décrits plus haut : les effets combinés voire les effets « cocktail », « émergents », « chaotiques » sont abordés dans les approches KISS mais ne renvoient pas à une légitimation « du terrain » de manière évidente. Or, pour aborder des SSERs, la complexité nécessaire doit correspondre à cette légitimité locale et physique. Par contre, dans une démarche d'argumentation, montrer qu'un phénomène est important peut passer par ce genre de modèle KISS, dans lesquels, le phénomène alors isolé, on en montre le poids : cet emploi en tant que modèle plaidoyer selon la classification de Kieken (Kieken, 2003) est ainsi un élément supplémentaire à la panoplie des outils d'argumentation pour l'intégration de dynamiques éventuellement négligées. Dès lors l'opposition KISS/KIDS peut être reformulée pour une plus formelle et plus courante articulation.

³⁷ Les règles sont valables pour tous même si elles se déclinent différemment pour chacun, que celui-ci soit une famille, un individu ou un espace de territoire

³⁸ Anthropologue ou sociologue, archéologue, agronome, économiste, etc., celui qui collecte des données sur le terrain sur des humains ou des territoires façonnés par des humains

Quantitatif vs. Qualitatif : Les données quantitatives sont une étape impérative pour une science reproductible : elles définissent le poids et les valeurs des différents paramètres qui, s'ils n'étaient pas caractérisés, produiraient des résultats flous et inutiles. Cependant, définir les paramètres nécessaires d'une dynamique socio-environnementale s'avère être une tâche extrêmement difficile. Par exemple, les modèles que j'emploie sont spatialement explicites, et comprennent donc des justifications sur la sélection et l'identité des paramètres spatiaux considérés, y compris la présence ou l'absence de caractéristiques spécifiques telles que les rivières, les biomes ou les catégories d'utilisation des terres. De tels débats ont lieu entre les partisans de diverses disciplines et sont, intrinsèquement, qualitatifs. Pourtant, on peut tout à fait construire des indicateurs de pertinence (par exemple §5.4.2. Les poids ou distances relatives, combinés aux rangs), fournissant un support formel à l'équilibrage à faire entre disciplines, de manière à ce que le modèle, objet collectif, ne soit constitué ni uniquement d'écologie ni de paysage vécu et expérimenté par l'homme. Cette souplesse de construction, produit d'un choix collectif qui s'appuierait sur un formalisme décrit plus loin (par exemple §5.2.1. ARDIQS) peut apparaître pour certains comme un défaut de la modélisation (« ce n'est pas basé sur des données ») mais le modèle ne visant pas à être réel mais à répondre à une question, ce peut être au contraire un atout.

« *Un machin pour faire des économies de collecte de données* » : la modélisation peut être perçue comme un exercice théorique, abstrait, intéressant mais pas nécessaire car, en particulier pour des disciplines scientifiques tirant la légitimité du terrain, seul celui-ci procure une légitimité, scientifique et institutionnelle. Cela pousse à privilégier toujours plus la collecte de données, sans jamais définir le moment où on s'arrête dans la collecte de ces données. Il est important de noter qu'est très rarement formalisé le critère par laquelle on considère que la collecte est suffisante : ne pas envisager qu'il existe même un seuil est un obstacle sociologique et pas scientifique, tenant d'abord d'un enjeu de légitimité dans sa communauté. Plus encore, la nécessité de simplifier n'apparaît pas évidente a priori et certains calculs doivent être fournis pour en montrer l'inéluctabilité : ainsi, on ne peut du terrain tirer toute l'information sur le Néolithique pour chaque maille du territoire et pour chaque pas de temps minimum choisi, la saison par exemple ou même l'année. Le Néolithique en Languedoc-Roussillon fait 4000 ans et ce territoire fait 2.7 millions d'ha. Faut-il faire 10,95 milliards de prélèvements pour assumer une synthèse ou peut-on élaborer des hypothèses et des théories quelque peu auparavant, ce qui revient de facto à ... modéliser ? Ainsi, effectivement, la modélisation est bien un outil à faire des économies de collecte pour rendre celles-ci utiles.

« *Dis pas que c'est moi* » : Ce problème de légitimité interne à sa communauté mais aussi externe sur le fait de voir les raccourcis, parfaitement normaux et normes au sein de chaque communauté mais vus comme méthodologiquement discutables en dehors, peuvent pousser certains à cacher « ce qui est en cuisine ». Plus encore c'est la formalisation de l'interdisciplinarité qui inquiètera : Les critères d'exigence interdisciplinaire ne sont que rarement posés. Par exemple, une procédure explicite de confrontation de résultats devrait permettre d'éviter de la simple juxtaposition de collectes de données. Cette explicitation peut être vue au contraire comme une mise à nu, une intrusion désagréable. Dès lors, assumer une simplification grossière sur sa thématique pour les besoins d'un modèle dont ce n'est pas la question première est un acte socialement complexe en termes de légitimité.

« *Montre ton modèle, on te dira si c'est bien* » : Une stratégie d'autoprotection face au risque de formaliser par une collaboration avec la modélisation et de le formuler « à haute voix », toujours dans de souci de légitimité, consiste à inverser la « charge de l'hypothèse », en formulant cette phrase citée en début de ce paragraphe. Or, quel que soit le temps que consacrerait un modélisateur à telle composante disciplinaire pour l'inclure dans un modèle, le temps perdu mais aussi la probabilité d'erreur sont bien plus importants : l'expérience et la connaissance d'un domaine par un spécialiste d'une discipline est heureusement irremplaçable et, j'insiste, cela est heureux.

« *Vous ne pouvez rien prouver* » : En pratique, rien ne peut jamais être prouvé selon les tenants du réfutationnisme absolu (Chalmers, 1982 ; Popper, 1985). Mais comme dit plus haut, cette charge de la preuve, au contraire de démarches plus reconnues dans les communautés scientifiques comme l'économétrie, revient sur cette modélisation sociale. Cette charge de dé-légitimation est paradoxalement d'autant plus forte que l'on va vers les sciences humaines et sociales : pour caricaturer, un pédologue aura beaucoup moins de problèmes avec cette démarche qu'un anthropologue.

Interdisciplinarité : quand en avons-nous besoin ?

En fait, plusieurs disciplines scientifiques n'ont pas besoin d'autres disciplines. On peut donc se demander : "quand avons-nous besoin de "l'interdisciplinarité"? Pourquoi, y compris dans le cas de l'étude SSER, ne conservons-nous pas l'approche analytique ? Pourquoi, comme cela a été fait ailleurs, n'est-il pas plus fructueux de diviser la question en morceaux, ce qui est un moyen plus facile d'acquérir des informations sur chaque morceau ? Il y a deux raisons à cela, qui sont évidentes pour le lecteur mais qu'il convient de rappeler ici :

- La première doit éliminer toute ambiguïté : avoir pu décortiquer un SSER en ses composantes que l'on va pouvoir analyser par la suite, c'est avoir déjà classé les composantes en question, avoir conçu ce système comme le regroupement structuré de composantes. C'est donc déjà modéliser, sans l'assumer ;
- La deuxième est le fait que ces composantes sont en interaction trophique, énergétique, spatial et constituent un ensemble cohérent : chaque élément bouge par rapport à d'autres composantes et l'ensemble des composantes font système. Ils font d'ailleurs écosystème car celui-ci combine biocénose et biotope et font socio-écosystème car ils incluent l'homme, animal au métabolisme semblable aux autres mais dont la capacité d'organisation et de planification des actions le rend incontournable dans le mécanisme de tout écosystème.

Bref, comme Mr Jourdain, lorsqu'on fait de la science, on modélise toujours, sans le savoir. Modéliser au sens informatique, c'est assumer cette formalisation et considérer qu'il faut le présenter et la défendre. Plus encore, même pour définir quelque chose, on classe et donc on modélise. Et pour ce faire dans le cas des SSERs, on fait appel à cette interdisciplinarité tant vantée. Mais comment pouvons-nous la caractériser au-delà du fait de dire qu'il y a plusieurs disciplines ? Mieux que d'utiliser un fond philosophique que nous considérons comme pertinent mais qui dépasse notre compétence et notre niveau d'abstraction, utilisons l'argument de la *vox populi* : Quand, où et dans quel domaine pouvons-nous voir un plaidoyer en faveur de l'interdisciplinarité ?

1. *La nécessité de faire face à un "obstacle épistémologique"* (Bachelard, 1938) : C'est une condition nécessaire mais non suffisante pour un besoin interdisciplinaire. Cela signifie seulement qu'un chercheur d'une discipline est confronté à un problème qui va au-delà de la science "normale" à laquelle il appartient.
2. *Le besoin de fond* : Le premier critère est évident : lorsqu'un scientifique ne peut pas emprunter des données et des informations à d'autres disciplines dont il peut avoir besoin sans connaître les mécanismes qui créent ces informations. Par exemple, l'utilisation des prix des biens collectés à partir d'un recensement économique pour mieux caractériser les besoins d'un groupe social dans une étude socio-anthropologique ne signifie pas qu'il s'agit d'une étude interdisciplinaire parce qu'on utilise des données économiques. Cela signifie que chaque discipline ayant son propre point de vue et ses propres paradigmes sur la réalité, avoir le contexte correspondant qui donne accès à ce point de vue et à ces paradigmes est donc une condition sine qua non de l'interdisciplinarité.
3. *La nécessité d'un paradigme sur la dynamique et les variables* : Le deuxième critère est lié au précédent et vient naturellement quand on pense à l'interdisciplinarité : il concerne la combinaison de disciplines très différentes les unes des autres. En fait, trois groupes peuvent être considérés :
 - Le groupe de physique : on peut expérimenter et on maîtrise tous les paramètres de l'expérience. Il appartient aux disciplines où la réfutation (Chalmers, 1982 ; Popper, 1985) peut être évaluée avec des expériences totalement contrôlées, c'est-à-dire où l'expérience est considérée comme *ceteris paribus*. Les relations et la dynamique sont définies en fonction d'un nombre limité de variables. Le déterminisme est quasiment complet (tant qu'on ne rentre pas dans le quantique), tenu compte de la connaissance des conditions initiales. Seules les données quantitatives sont prises en compte ;
 - Le groupe de biologie : on peut expérimenter et on ne maîtrise jamais tous les paramètres de l'expérience. Il appartient aux disciplines où la réfutation peut être évaluée à l'aide d'observations et d'échantillons, avec le soutien de certaines expériences contrôlées. Les relations et les dynamiques sont définies en fonction d'une gamme moyenne de variables. Outre les effets quantiques et des conditions initiales, le non-déterminisme est apporté par le manque d'informations sur les différentes fonctions biologiques (par exemple, la capacité d'absorption d'eau ou d'autres éléments diffère d'une plante à l'autre) mais aussi l'émergence, c'est-à-dire la propriété d'un phénomène qui est une combinaison de plusieurs éléments et dont le comportement ne peut être réduit à chaque élément (Müller, 2002). Cependant, seules les données quantitatives sont prises en compte, mais la dynamique peut être décrite selon des schémas

qualitatifs sans déterminisme (par exemple, les animaux ne pilotent pas leur destin en l'absence d'autoréflexivité ;

- Le groupe des sciences sociales : Formellement, on ne peut pas expérimenter et on ne maîtrise jamais tous les paramètres. En pratique, aucune expérience ne peut être évaluée, à l'exception de quelques expériences de comportement très contrôlé bien connues mais douteuses, comme celle de Milgram testant le degré d'obéissance. Comme il est beaucoup plus difficile de caractériser les variables qui ne font pas partie du système étudié (Pourquoi la psychologie sociale ne fait-elle pas partie intégrante de l'économie ?), les relations et les dynamiques sont définies en fonction d'un large éventail de variables. Les hypothèses sont proposées avec beaucoup plus de conditions et beaucoup d'anthropologues ont tendance à éviter les théories. La réfutation ne peut être évaluée qu'à l'aide d'observations et d'échantillons. Les conditions initiales, le manque de connaissances différentielles et l'émergence, le non-déterminisme est partout : aucun groupe humain ne se comporte jamais deux fois de la même manière. Pour faire face à la diversité des variables et au non-déterminisme structurel, les dynamiques sont principalement décrites et caractérisées de manière qualitative, appuyées par des données quantitatives. Des outils et des données tant qualitatifs que quantitatifs sont utilisés.

Ces trois groupes ont, en raison des différences entre les paradigmes, les principes, les méthodes et les pratiques, de grandes difficultés pour l'inter-dialogue. Dès lors, l'interdisciplinarité est nécessaire si et seulement si elle concerne les sciences qui appartiennent à au moins deux de ces groupes.

4. *Modéliser et reconstituer, c'est simplifier* : Cependant, comme tout objet interdisciplinaire, le modèle que l'on va construire et l'objet reconstitué par cette modélisation, ne peut qu'être moins complexe que la réalité. Il est donc important de poser absolument et définitivement ce principe : On ne peut rendre compte des spécificités des objets disciplinaires qui composent tout objet interdisciplinaire et cela concerne donc les objets modélisés. Je développe certes plus avant par la suite les manières de simplifier puis combiner et enfin tester ces objets pour que le résultat obtenu soit le plus légitime possible. Mais quelle que soit la qualité de ces démarches, l'objet sera toujours plus simple que ses composantes issues des disciplines mobilisées. Là encore, c'est une évidence, mais cela implique qu'un scientifique ne peut pas voir son thème modélisé dans toute sa complexité. Par conséquent, exiger une légitimité intra-disciplinaire à un objet interdisciplinaire n'a pas de sens : l'objet est cohérent à l'échelle des éléments qui se sont rajoutés et l'objet est plus simple pour chaque discipline que celle-ci pourrait en dire. S'il n'y a pas de simplifications donc de perte de complexité, ce ne peut être un objet interdisciplinaire.

La modélisation comme soutien nécessaire à l'interdisciplinarité

En pratique, modéliser pourrait ne pas avoir à recourir à l'interdisciplinarité : Un économiste pourrait ne considérer que des éléments économiques en considérant que ceux-ci suffisent, un pédologue des sols cultivés pourrait ne considérer que l'évolution des sols. Mais pour envisager de dépasser le constat, dans le cas de l'observateur, et de faire une prospective, à savoir une projection dans le temps, vers le futur, vers d'autres scénarios alternatifs, par exemple de gestion du territoire, ou dans l'espace par exemple sur des territoires similaires, cela revient très vite à diminuer la portée potentielle du travail réalisé. Inversement, faire de l'interdisciplinarité pourrait-elle se faire sans modéliser ?

1. *L'explicitation* : c'est paradoxalement l'atout principal de la modélisation formelle : elle impose d'éviter les ambiguïtés et les zones d'ombre. L'étude d'un SSER amazonien parsemé de champs de café, de cacao et de pâturages ne pourra pas s'affranchir des variables sociales ou économiques conditionnant les choix entre ces productions. Plus généralement, une modélisation efficace (au sens où elle produit des résultats non envisagés initialement, contre-intuitifs et/ou non prédictibles grâce à la combinaison de dynamiques éventuellement issues de disciplines différentes) « force » à intégrer toutes les dynamiques qui priment et rendent « visibles » les dynamiques qui ne le sont pas une fois établis les critères qui les sélectionnent (par exemple un poids, le rang de variable comme décrit précédemment). Plus encore, elle oblige à mettre à nu les zones inconnues de dynamiques que des spécialistes pensent pourtant bien connaître. Ainsi, à la question « comment est un champ néolithique », la réponse portait sur les espèces cultivées mais pas ce qu'il y avait dans le champ : densité de semis, cultures associées, fumure, tous ces éléments conditionnant l'air qu'aura ce champ, et donc ce qu'il produit.

2. *L'effectivité* : Toutes les dynamiques envisagées par les chercheurs doivent être passées au crible de deux questions : Qu'est ce qui est important et à intégrer dans un modèle ? Qu'est-ce qui ne l'est pas ? Une variable non discriminante, parce qu'uniforme partout et/ou parce que le lien de celle-ci à d'autres éléments n'est pas effectif³⁹ n'est pas en pratique une variable et elle doit ainsi être retirée ce qui simplifie souvent le problème. De plus, cette même effectivité impose de rendre actif une relation. Elle impose sur le système une cohérence issue de la réalité, non celle de la nécessaire harmonie du système mais seulement de l'interaction physique des éléments qui le constituent. Ainsi, on se doit d'intégrer au système modélisé des éléments qui sont nécessaires (par exemple, les pluies, les pentes, les sols ou tout autre élément biophysique ou humain apparaissant comme essentiel) même si l'on ne dispose pas des données adéquates : S'il y a accord sur le fait que la fertilité des sols est une variable importante, cela signifie qu'elle est variable dans le temps et dans l'espace (une fertilité élevée partout et stable ne sert à rien). Mais aussi qu'on a obligation de rendre compte de cette relation et qu'il faut donc pouvoir estimer même grossièrement, même en absence de données, son impact et la variation de cet impact sur les différentes composantes de ce territoire sur la productivité végétale, puis agricole et pastorale. On va devoir « bricoler », chercher une manière d'approximer, de trouver un ordre de grandeur, d'inférer à partir d'autres données et d'autres sites, mais cela ne peut être négligé.
3. *L'intérêt collectif* : cela s'applique également à la formalisation sociale et environnementale d'objets interdisciplinaires complexes : le point précédent, à concevoir par le modélisateur seul, « force » également l'assemblée des concepteurs, si tant est qu'elle souhaite voir aboutir cet exercice, de formaliser l'intrication de leurs disciplines de manière assumée : réaliser le modèle, informatisé ou non, requiert pour chacun de sacrifier une part de la complexité de son propre thème sur l'autel de la combinaison des disciplines, juste pour que cela puisse marcher. Il s'agit alors de trouver en pratique pour la coordination de ces modélisations les moyens de valoriser fortement l'effort d'interaction, une maïeutique collective, jusqu'à ce qu'il contrebalance la tâche disciplinaire de chacun : la légitimité de l'objectif et des responsables est alors cruciale.
4. *la meilleure complexité* : Cette exigence sur les variables (on ne peut écarter certaines car le système perd de sa cohérence) peut ainsi s'accompagner d'une moindre exigence sur les données (si on ne les a pas, on les « bricole » et on cherche d'abord à en garder l'ordre de grandeur) : en tous les cas, l'erreur quant à l'appréhension du système est à nos yeux moins grande. Plus globalement, parce que les objets de recherche interdisciplinaire tels que les systèmes socio-écologiques comprennent de facto de nombreuses disciplines, en éliminer certaines (parfois en raison du manque de données, une méconnaissance quant à leur importance, leur fonctionnement, leur simple appréhension, la peur d'y perdre du pouvoir, etc.) est une erreur importante. Plus précisément, prendre en compte toutes les composantes d'un système socio-écologique (y compris la société, l'environnement et l'économie) et simplifier chaque composante est plus pertinent et moins dommageable que de négliger certaines activités en se concentrant sur celle qui semble être la plus importante. Ainsi, avant de modéliser certaines composantes, par exemple dans une approche KISS, une approche KIDS serait ainsi primordiale au sens étymologique du terme.
5. *Modéliser, c'est simplifier pertinemment* : les systèmes socio-écologiques ont besoin de formalisme méthodologique pour appréhender un système fluctuant et complexe, c'est-à-dire un modèle : Tout système, quelle que soit la discipline à laquelle il appartient, ne peut être pleinement connu, observé et décrit dans sa totalité : il faut approximer, simplifier. Il est simplement impossible de tout savoir car le nombre de variables puis de données nécessaires est infini et changeant à chaque instant. On doit avoir alors choisi un sous-ensemble de variables considérées comme pertinentes en accord avec nos intérêts et nos besoins. Dès lors, étudier un SSER, c'est par conséquent choisir quoi garder et quoi négliger en simplifiant. C'est donc définir les critères par lesquelles justement est décidé quoi garder et quoi négliger en simplifiant, de manière à se garder de tout tropisme vers telle ou telle dynamique d'un système, pour des raisons de confort intellectuel, d'assurance quant aux données disponibles ou autre différenciation qui pourrait être faite. Ces variables doivent être identifiées et hiérarchisées selon un paradigme ou un principe (perception locale ? accord commun des experts ?) qui légitime leur sélection au détriment d'autres variables. Je plaide pour une

³⁹ C'est le cas souvent lorsque sont confondus indicateurs et variables, comme par exemple, le taux de charbon, d'ostracodes, de pollens de telle ou telle espèce, et l'intensité de l'usage du territoire par des agriculteurs néolithiques

formalisation des critères, du principe sur lequel les variables sont désignées comme pertinentes. Tout au long du flux aller-retour entre l'induction et la déduction qui se pratique *de facto*, ces critères posés devraient être *de jure* aussi les critères de "validation". L'obstacle est ici le fait que les travaux thématiques portent souvent sur des variables de variables de variables. Par exemple, le projet PALEOMEX suggérait de considérer le poids de l'aridification de la Méditerranée au Néolithique sur les sociétés humaines du pourtour languedocien. Mais pour cela, il faut déjà définir les besoins humains (une Variable pourrait définir la satiété soit la faim compensée par la nourriture). On envisage ensuite les dépendances des sociétés humaines aux ressources permettant de fournir de la nourriture et donc lister et paramétrer les activités humaines et les autres dépendances (pour éviter une évidence linéaire) soit une Variable de Variable (en fait, plusieurs pour chaque activité). Pour chaque activité, il faut établir les ressources reliées (par exemple chasse et gibier, soit des Variables de Variables de Variables qu'on nommera ici Variables³) et définir ce qu'un degré °C ou 20mm de pluie entraîne sur cette faune, voire sur les différents types de faune (soit donc Variables⁴). Là seulement, on va estimer ce que cette aridification fait à la végétation (Variable⁶) donc à la faune donc à la chasse donc au gibier ramené, donc à la nourriture, donc au fait que les humains soient sustentés. De même, à la question « quels sols sur ce territoire et quel impact sur les champs », la donnée pédo-stratigraphique fournira un indicateur (c'est un sol de tel type) qui, traduit en variable (par exemple : il diminue la récolte obtenue de tel pourcentage par rapport au niveau optimal existant). La relation climat-sol est une Variable³ affectant une Variable², la fertilité pour un sol affectant une Variable¹, l'impact de cette fertilité sur la plante cultivée ;

6. *Transdisciplinarité* : c'est construire des objets dont les comportements seront décrits dans l'espace de ses paramètres par le modèle ainsi construit (par exemple un terroir du néolithique européen) et qui ne peuvent être compris que par cet outil combinant plusieurs disciplines. Ainsi, par exemple, le comportement de la population d'un village à différents chocs sociaux et environnementaux est modélisable : il sera plus ou moins robuste quant à telle ou telle variable biophysique du fait des caractères internes des composantes de ce terroir (par exemple, sous une certaine limite de densité démographique, la résistance à la famine est énorme du fait de la disponibilité en gibier et en Produits Forestiers Non-Ligneux). On ne peut en décrire le comportement sans le modèle et cet objet est donc transdisciplinaire. Cette nouvelle entité peut être traitée par analyse de sensibilité et « résumé » pour constituer une nouvelle entité, un terroir néolithique européen moyen et ses déclinaisons selon différents paramètres environnementaux. Lui-même pourra être intégré comme entité de base dans un autre modèle à plus grande échelle, par exemple l'Europe néolithique. On a donc créé par le modèle des entités non compréhensibles ou réductibles à une discipline qui permettent par leur sensibilité à des variables diverses de rendre compte de dynamiques complexes. On les définira ainsi comme transdisciplinaires ;
7. *La plausibilité* : Outre la nécessité d'une formalisation de l'information comme deuxième partie obligatoire du processus de recherche, la formalisation des éléments est un remède contre les approches scientifiques qui se focalisent sur elles-mêmes. Selon l'erreur malheureusement courante de la boucle d'autocontrôle⁴⁰, on peut considérer que "valider" une fonction provenant d'une discipline scientifique avec des données de la même discipline présente beaucoup plus de risques de créer une boucle similaire. Je plaide alors pour des étapes de "validation" qui impliquent l'utilisation d'ensembles provenant d'autres disciplines afin de réduire les risques de telles boucles.
8. *La contestabilité* : Au titre du point précédent et plus précisément, comme les modèles sont toujours et fondamentalement faux mais plausibles statistiquement (plus précisément, ils ne représentent jamais parfaitement la réalité et ce, comme toute théorie), il est possible de les contester et de les réfuter, par reproduction des résultats, tests statistiques, analyses de sensibilité, exploration de l'espace des paramètres à la manière d'une paillasse expérimentale. Le modèle est effectivement cela, une paillasse pour effectuer de multiples expériences (scénarios, politiques, etc.) sur des systèmes uniques, dont l'histoire est unique et sur lesquels on ne peut changer les conditions. Les trois défauts des sciences sociales et biologiques sont ainsi levés au travers de ces outils : réfutabilité, reproductibilité, exploration par expérimentation. Plus encore, lors de la conception des modèles, ils peuvent déjà être discutés et contestés dans l'assemblée des personnes

⁴⁰ Un ensemble de données est utilisé pour caractériser une fonction décrivant un phénomène et pour "valider" cette fonction, elle est comparée aux mêmes données qui l'ont créée

impliquées dans cette modélisation, simplement sur le fait que le modèle répond au test de Turing, i.e. mime effectivement la réalité décrite par différents thématiciens ;

9. *Exactitude* : Dans le prolongement du point précédent, l'interdisciplinarité est un test de rigueur scientifique et, plus précisément, d'exactitude. L'exactitude est souvent confondue avec la précision et la précision présente ce caractère attractif des données à plusieurs chiffres après la virgule. Mais que signifient de tels chiffres pour des situations comme par exemple, des prospectives démographiques au Niger sans tenir compte de la migration (Banoïn & Guenguant, 1999) ? Des articles scientifiques justifient le choix des variables d'une problématique par des poncifs (« de tous temps », « tout le monde sait ») ou par rien : pourquoi ces dernières sont-elles choisies et pas d'autres ? Il convient alors de différencier les variables et les données (les variables permettent d'obtenir des relations et des dynamiques tandis que les données paramètrent ces relations) et de caractériser par la suite l'étendue de l'objet de la recherche, c'est-à-dire son exactitude avant de s'attacher à la précision.

4.1.3 Modéliser est donc si difficile, conflictuel et ennuyeux ?

Positionnements et difficultés des représentants disciplinaires

Nous avons vu que l'intérêt de la modélisation est déjà limité en tant que tel. Pour autant ces difficultés, pour valables qu'elles soient, cachent l'obstacle fondamental qui est social : la peur de la perte de contrôle pour chacun des participants à une démarche interdisciplinaire, elle-même sous-tendue par quelques malentendus scientifiques :

- Pour les chercheurs en SHS, le problème est de devoir assumer quelque chose dont on n'est pas sûr : il faut assumer l'élément suivant : tout le monde modélise. Mais cela est plus difficile pour l'analyse de phénomènes socio-environnementaux qui sont par nature complexes (avec beaucoup de variables), instables (les relations ne sont pas invariables) et compliquées (difficile de déterminer les relations *ceteris paribus*, ne pouvant faire des expériences sur une population) et pour lesquels il est difficile de trouver de la donnée. Les chercheurs en SHS savent qu'ils traitent de sujets pour lesquels, contrairement aux sciences dites « exactes », tout ne peut être appréhendé complètement : on n'est jamais sûr d'avoir intégré tous les paramètres et pour chacun, d'avoir toutes les données. Ainsi, pour citer David Clarke, l'archéologie est la "discipline qui a pour objet la théorie et la pratique de la récupération de modèles de comportement d'hominidés non observables à partir de traces indirectes dans de mauvais échantillons" (Clarke 1973 : 17). Modéliser, c'est poser des règles qu'on assume comme valables et plus encore qu'on quantifie sans en être sûr, et surtout, c'est devoir l'assumer devant ses pairs quand on en n'est pas sûr soi-même. Socialement dans sa communauté de recherche, c'est prendre un risque de se tromper et d'étaler son erreur, risque qui est de 100%, les modèles n'étant jamais parfaits ;
- Pour les chercheurs en sciences biophysiques, le problème est la génération artificielle de données : formaliser un modèle de relations environnementales, c'est commencer par hiérarchiser les variables intervenant dans ce phénomène et sélectionner le seuil à partir duquel on se doit d'intégrer ces variables. Le seuil devient le plus souvent, par défaut, la disponibilité des données. Effectivement du point de vue de la modélisation, le développement de modèles se veut aussi une proposition de réponse à un vieux problème, à savoir la résolution généralement faible et le caractère fragmentaire des données, qu'elles soient biophysiques ou sociales. Pour que le modèle tourne, il faut « créer » *in extenso* des données. Autant le faire selon un formalisme explicite, selon des règles également explicites, assises chacune selon la moins mauvaise information possible. Mais cela peut poser des problèmes renvoyant même à l'éthique pour ces chercheurs dont la légitimité vient du terrain ;
- Pour les chercheurs dont le terrain est la légitimité première, venant des deux groupes précédents, cela met en danger cette légitimité. Ainsi, nombre d'anthropologues et archéologues réagissent violemment avec les malentendus suivants : de l'information est créée par le modèle qui « va nous sortir » les règles anthropologique si patiemment déduites du terrain : la peur est ainsi double, que ces modèles soient des échecs patents mais suffisamment attractifs et envahissants, oublieux de toute la complexité humaine, ou qu'au contraire, ce soit des réussites, risquant de favoriser la recherche de données et la perte de la pratique de l'imprégnation et du terrain. J'ai pu observer certaines réactions parfois violentes, où l'interlocuteur

cherchait à tout prix une erreur : « s'il y a une erreur, c'est donc que ce n'est pas parfait, donc c'est à jeter ». Comme les modèles sont toujours faux, l'échange intellectuel devient alors limité ;

- Enfin, les modélisateurs et autres spécialistes, en charge de l'analyse de SSERs et de la construction des modèles Multi-Agent correspondants, doivent gérer le manque de légitimité donné aux modèles SMA comme noté par Bommel (2009), au contraire de modèles mathématiques qui n'ont pas à prouver leur effectivité. Cela a pour conséquence le fait que formaliser et répondre, tant conceptuellement, épistémologiquement et méthodologiquement, aux objections des thématiciens est une entreprise au long cours. Par bien des aspects (non-reproductibilité, non-transmissibilité, sur-dépendance aux conditions initiales, etc.), les modèles multiagent sont discutables mais ne le sont pas plus que d'autres outils. Le point de vue constructiviste appelle à prendre la mesure et par conséquent des précautions quant à la validité de ces modèles mais il n'y a pas besoin d'un niveau d'exigence supplémentaire dans la validation d'un modèle SMA.

Pour simplifier, les sciences sociales font des soupes sans avoir de recettes, les sciences biophysiques font quelque chose appelé soupe sans savoir ce qu'il y a dedans et l'informatique a une recette, l'idée de soupe et n'arrive pourtant jamais à refaire la même soupe. Il s'agit donc, non pas de nier ni de dépasser ces obstacles épistémologiques, mais de les considérer comme ils sont et les prendre comme des précautions, liées de manière inhérente à toute démarche scientifique.

Dans ce panel, les sciences sociales affrontent des facteurs d'incertitude supplémentaires. Pour reprendre Jared Diamond, « *Soft sciences are often harder than hard sciences* » : « Les sciences dites « molles » ou sociales sont souvent plus dures que les sciences dures ». De manière explicite, c'est formaliser le fait que les sciences sociales ont de facto à affronter des problèmes qui se distinguent de ceux en sciences dures sur plusieurs points. Même si nombre d'entre eux ont déjà été listés dans le corps de ce manuscrit, il me paraît pertinent de les récapituler :

- Comme toutes les sciences travaillant sur des structures existantes (de la cosmologie à l'écologie de terrain), les sciences sociales ne peuvent réaliser d'expérimentation. Seuls les outils de la modélisation peuvent créer une paillasse d'expériences virtuelles ;
- Les variables caractérisant une entité scientifique en sciences sociales (un SSER, une famille, une société...) sont très souvent plus nombreuses qu'en sciences dites « exactes » ;
- Elles ne sont pas évidentes a priori et doivent donc être inventoriées et caractérisées en tant que telles comme on doit justifier pourquoi certaines seraient éliminées ; c'est le rôle de l'imprégnation mais aussi de l'observation participante en anthropologie qui, du contexte, permet de dégager ce qui importe. C'est par la saturation en entretiens qu'on peut envisager ce qui peut ensuite être négligé ;
- L'acquisition des données correspondantes nécessitent le plus souvent plus d'investissement en logistique, en temps, en énergie et patience et donc en argent ;
- Enfin, ces données ont une valeur limitée dans le temps et dans l'espace car il n'y a pas dans l'action humaine d'isotropie spatiale⁴¹ et temporelle⁴²

On comprend alors pourquoi :

- Nombre de scientifiques et les sciences exactes en particulier se fieront de préférence aux variables fournissant des données accessibles (le satellite est parfait pour cela), exhaustives (équivalentes et recensées partout, cf. « *Egi per precium* » §4.1.1.3.) et par conséquent favorisent ces variables dites exactes, induisant très fortement une surdétermination des questionnements sur des dynamiques environnementales autour de causes physiques et pas sociales (par exemple, le changement climatique sur la désertification au détriment de la démographie).
- En termes de conceptualisation et de modélisation, la tentation bien compréhensible pour les sciences exactes d'éliminer ces « choses floues et molles » que seraient les sciences sociales, pour citer un collègue,

⁴¹ *Les gens ne pensent et n'agissent pas de la même manière d'un lieu à l'autre dans les mêmes circonstances : ce n'est pas seulement du bruit, de la variabilité dans l'éventail des réactions humaines mais des différences structurelles et significatives dans les rationalités et les pratiques médianes et moyennes d'un endroit à l'autre. Cependant, il y a une certaine marge de généralité acceptée pour caractériser les pratiques et les croyances, variable selon les thématiques*

⁴² *D'une période à l'autre, la même société voire les mêmes personnes n'ont plus les mêmes croyances et rationalités concernant certaines thématiques.*

parce que pas assez caractérisée (quelle sous-variable ? quel protocole ? quel mode d'action ?) et parce que pas assez de données. Cette tendance est mue d'abord par un souci d'honnêteté scientifique : « on ne peut rien dire par manque d'information ». Mais en sciences sociales, cette même honnêteté pousse à inclure la variable même si les données ne sont pas assez bonnes : répondre au problème posé impose d'intégrer cette question, ce qui implique que la moins mauvaise réponse est celle qui intègre tous les éléments mêmes flous. Ces deux honnêtetés, appelés plus haut pointillisme vs. Impressionnisme, sont tous deux très légitimes mais s'opposent dans la pratique. Elles peuvent cependant se reconnecter dans le fait d'emprunter aux sciences sociales le souci d'inventorier et de justifier les variables indépendamment des données disponibles et aux sciences biophysiques la notion de réfutation et de test. Cette démarche est décrite plus avant en §4.3.

Rapports sociaux au sein de la recherche et interdisciplinarité

L'interprétation de phénomènes complexes, en particulier lorsqu'on s'occupe d'un système socio-écologique, est liée de facto à la question de recherche, c'est-à-dire à la partie qui est considérée comme intéressante et pertinente : cela a tout à voir avec les notions de subjectivité et d'objectivité, même en science, puisqu'il n'est pas possible de fournir un argument irréfutable aux délimitations choisies pour circonscrire un système socio-écologique à étudier, sauf à le restreindre à une question de recherche. Il y a alors ici un quadruple risque :

1. L'impossibilité de contestation car dans une entreprise idéologique⁴³ à double titre : La Connaissance et le Bien commun (sauver la planète, montrer une science nouvelle, etc.) sont des notions qui portent un affect. L'abord d'un système socio-écologique a un contenu affectif : tel chercheur aime aborder tel sujet. Ainsi, la modélisation incite non seulement à définir les dynamiques étudiées mais aussi à justifier le pourquoi d'une question de recherche qui va induire cette modélisation, justification qui peut se heurter à cet affect ;
2. Toujours du fait que c'est une entreprise à soubassements idéologiques, la difficulté à reconnaître le conflit et la légitimité de l'opposition une fois la contestation explicitée : Tout groupe, y compris les chercheurs, a des relations conflictuelles. De tels conflits sont "sociologiquement normaux" : les oppositions formelles ouvertes sont moins néfastes que les intentions cachées. Pour autant, une interaction sur des objets à cheval entre disciplines, appartenant à l'une et à l'autre, induira forcément des conflits humains qui doivent être considérés comme une composante normale de tout projet de recherche ;
3. L'orientation du projet selon les rapports de force entre acteurs. Mes contrats de recherche, en particulier avant mon recrutement, m'ont permis d'être observateur dans la mise en place de projets de modélisation (Projet RTRA MAELIA et projet ANR OBRESOC). La construction de ces modèles obéissent par défaut à des logiques non pas scientifiques mis entièrement basés sur des rapports de force combinant (1) Autorité scientifique et puissance institutionnelle, (2) Puissance financière, (3) Capacité à établir et maintenir une stratégie dite « du fou » ou « de l'emmerdeur » (créer de l'appréhension chez l'interlocuteur et donc le dominer par la récurrence d'actes apparemment irréflechis ou systématiquement excessivement tatillons, respectivement). Cela est renforcé par le fait que l'interdisciplinaire est le moins armé, car il est naturellement en construction donc facilement soumis à des structures hiérarchiques déjà établies ;
4. De risque perpétuel de retrait d'une composante de l'équipe interdisciplinaire par différents sophismes (en particulier, le manque de données et la contestation en légitimité de la communauté d'origine). On peut alors comprendre que, comme ces conflits apparaissent plus facilement dans des contextes interdisciplinaires, ce risque supplémentaire justifie de préférer rester simplement dans sa discipline ;

La prise en compte et l'explicitation de ces risques et de ces enjeux doit être intégrée comme élément de négociation de l'interdisciplinarité entre humains scientifiques, sur base de l'anthropologie et de la théorie des jeux afin de le formaliser comme un biais parmi d'autres. La méthode ARDI (Etienne et al. 2011) apparaît un élément utile dès lors que l'animateur n'est pas contesté. Ainsi, trois composantes de la démarche peuvent être

⁴³ Terme que j'emploie afin de définir toute action construite collectivement dans laquelle la mise en place d'une éthique rend absolue et incontestable le critère d'évaluation et donc créant un argumentum ad autoritatem, sensé clore toute conversation : la Religion, ou autre et dans notre cas l'Humanitaire, la Science, le Bien Commun...

considérées comme se succédant dans le processus de constitution d'un modèle et aucune ne devrait dominer le projet :

1. La collecte d'informations. Dans la perspective d'un modèle spatialisé, un outil que je privilégie pour des raisons à la fois conceptuelles et pratiques est à mon sens primordial au sens étymologique du terme au sens où il arrive en premier dans le protocole : il s'agit du Zonage à Dires d'Acteurs que je présente dans la partie suivante (§4.2.) et qui recense les variables spatialisables sur lesquelles j'irais ensuite chercher des données, sur le terrain et dans les données déjà disponibles. Cette étape ne devrait pas dépasser la moitié du temps ni des sommes consacrées ;
2. La méthode ARDI puis ARDIQ puis ARDIQS vient ensuite dans l'articulation des composantes du modèle. En pratique, ces deux étapes peuvent avoir lieu concomitamment. Elle est développée en §5.4.1. ;
3. Enfin, la modélisation proprement dite est présentée sur le reste de la section §5. Elle ne devrait également pas dépasser la moitié du temps ni des sommes consacrées ;

Saqalli M., Vander Linden M. 2019. Integrating qualitative and social science factors in archaeological modelling. Springer Simulating the Past books Series. Springer Editions, New York, USA.

Dont Vander Linden M., **Saqalli M.** 2019. Chap. 1 Introducing qualitative and social science factors in archaeological modelling: necessity and relevance.

Dont **Saqalli M.**, Saenz M., Belem M., Lespez L., Thiriot S. 2019. Chap. 2 *O tempora O mores*: Building an epistemological procedure for modeling the socio-anthropological factors of rural Neolithic socio-ecological systems: Stakes, choices, hypotheses and constraints.

Dont **Saqalli M.**, Vander Linden M. 2019. Chap. 11 Trowels, processors and misunderstandings: concluding thoughts.

Méjean R., Paegelow M., **Saqalli M.**, Kaced D. 2019. Business-as-Usual Scenarios in Land Change Modelling by Extending the Calibration Period and Integrating Demographic Data. Geospatial Technologies for Local and Regional Development, 243-260. Springer, Cham.

Paegelow M., Maestriperi N., **Saqalli M.** 2018. La prospective territoriale : de la modélisation spatio-temporelle aux scénarii futurs. In : Systèmes Complexes : de la Biologie au territoire. Les dossiers d'Agropolis International.

Saqalli M., Belem M., Gaudou B., Saenz M. Paegelow M., Maestriperi N. 2018. Modéliser les sociétés et leurs territoires : de l'importance des sciences sociales. In : Systèmes Complexes : de la Biologie au territoire. Les dossiers d'Agropolis International.

Saqalli M., Chakroun H. 2018. Conférence SICMED : Métrique des Soutenabilités : Introduction, justification et Bilan. Atelier SICMED : Métrique de soutenabilité et indicateurs. Hammamet, Tunisie, 26-29/11/2018. <https://aed.org.tn/atelier-sicmed-metrique-des-soutenabilites-et-indicateurs-26-29-nov-2018/>

Saqalli M., Saenz M. 2017. Review of "Analytical Methods for Dynamic Modelers" by H. Rahmandad, R. Oliva, N. D. Osgood, G. Richardson. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 20, 3.

Saqalli M., Maestriperi N., Saenz M. Belem M. The world is not enough: pleading against the data gap postulate for building interdisciplinary research actions. Actes des rencontres de Rochebrune. 02/2016.

Saqalli M. 2015. Review of "Understanding society and natural resources: Forging new strands of integration across the social sciences" by Michael J. Manfreda, Jerry J. Vaske, Andreas Reckemmer, Esther A. Duke (eds.). Journal of Artificial Societies and Social Simulation 18, 1.

Neumann M., Braun A., Heinke E.-M., **Saqalli M.**, Srblijinovic A., Wijermans N. 2011. Challenges in modeling social conflicts: Grappling with polysemy. Journal of Artificial Societies & Social Simulation, 40, 1.

Saqalli M., Thiriot, S., Amblard, F. 2010. Investigating social conflicts linked to water resources through agent-based modelling. NATO Science for Peace & Security Series, 75, 142-157.

Saqalli M. 2010. Uncertainty in assessing & modelling social changes in rural areas. Novembre 2010. 3ème ESSA Special Interest group on Social conflicts. Aix-la-Chapelle, Allemagne.

Saqalli M. 2010. Variables, methods & data for agro-ecological & socio-economic integration. Novembre 2010. "ICRAF Global Futures project workshop: Enhancing modelling capability and empirical data to assess the economic impacts of agroforestry and other natural resource management interventions", Nairobi, Kenya.

Saqalli M., Thiriot S., Amblard, F. 2009. Water-related social conflicts: an analysis through agent-based modelling. 11/12/2009. Complex societal dynamics: Security challenges & Opportunities, NATO ARW Zagreb, Croatie.

4.2 Enquêter : Approche spatiale de reconstitution des perceptions locales

4.2.1 Le Zonage A Dires d'Acteurs et le signal faible : Les enjeux du diagnostic territorial

Le Zonage à Dires d'Acteurs ou ZADA est un outil de cartographie par enquêtes auprès de populations considérées comme pertinentes sur un territoire. Pertinentes signifie ici qu'elles sont à la fois potentiellement affectées par celui-ci (elles y habitent, y travaillent, y passent, leur vie peut être conditionnée par le territoire et ce qui s'y passe) et concernées par ce territoire (elles en ont une connaissance, par la pratique, par l'action en charge de la collectivité, par la transmission d'informations livresque ou locale). Comme souligné par Arnstein (1969), cet outil est souvent qualifié de « participatif » mais je souligne l'aspect incantatoire, voire publicitaire de ce terme : la participation s'arrête ici à la « consultation » (voir Figure 42), i.e. au recueil d'informations locales, sans abandonner de pouvoir dans la négociation de la hiérarchie des priorités d'action éventuellement obtenues à partir de la fusion des données de ces séries d'enquête.

Je suis parti des travaux de Caron (1998 ; 2001) et Bonin et al. (2001). Ceux-ci, sur un terrain au Brésil, ont proposé une méthodologie de recueil des perceptions locales à l'échelle régionale, en replaçant un site particulier dans son contexte historique, agro-écologique et socio-économique. Les sites sont décrits au travers d'unités spatiales séparées qui sont caractérisées par des critères proposés par les interviewés. Chaque unité doit être spatialement homogène par rapport à ces critères afin de simplifier l'analyse en considérant les processus dynamiques et les fluctuations entre les unités comme des éléments individuels. L'objectif est double : l'établissement d'un dialogue entre les agents de développement et les villageois à travers l'action de cartographie mais aussi la reconstitution spatialisée de l'histoire du lieu par une transcription en chorèmes (Caron, 2001 ; Sabourin et al. 2004). L'outil ZADA permettait de remplir de nombreuses lacunes dans l'approche spatialisée des enjeux de développement et d'environnement d'un territoire. Ces lacunes correspondaient à l'absence de rencontre entre des approches très inductives, issues des sciences humaines et du développement et les approches techniques, déductives, issues des sciences biophysiques :

La première lacune concerne le positionnement géographique : intégrer les résultats de cartes mentales dans un Système de positionnement Géographique (SIG) est une gageure (Bailly, 1986 ; McNamara, 1992 ; Halfacree, 1993 ; Touré et al. 2004). C'est le cas des évaluations rurales participatives (PRA ou MARP en français), l'un des principaux outils utilisés par les agences de développement dans leur approche du développement (Loader & Amartiya, 1999 ; Olivier de Sardan, 2003a) : les MARPs sont une combinaison d'outils communautaires incluant une représentation spatiale mentale des habitants sur le territoire de leur village et du terroir correspondant. Les PRA sont faciles à intégrer dans une méthodologie de premier contact et de programmation, ne sont pas coûteux à adopter et sont bien adaptés aux échelles auxquelles les agences de développement interviennent (Chambers, 1994). Cependant, sans référence géographique, l'information est conceptuelle et qualitative : elle ne peut être quantifiée pour estimer et comparer des situations sans une connaissance préalable de l'organisation locale. Les tentatives ultérieures de les repositionner dans des systèmes d'information géographique (SIG) aboutissent généralement à un échec. Des approches combinées, par exemple de SIG informatisé et de cartographie mentale (Campo, 2003 ; Touré et al. 2004) ou des croquis cartographiques à réintégrer dans un SIG (Oliveira d'Antona et al. 2008) ont été tentées sans suites fructueuses. Les cartes mentales ne sont ainsi pas à rejeter mais maintiennent le clivage entre méthodes scientifiques : ces cartes qualitatives ne peuvent être mises en regard avec d'autres cartes et une fois produites et commentées entre elles, on ne sait quoi en faire. Le ZADA permet d'une part de positionner les variables recensées et de pouvoir les comparer entre elles mais aussi de confronter ces résultats avec des données extérieures, octroyant une valeur de test à la démarche.

La deuxième lacune concerne l'échelle : les cartes mentales se font au niveau du village et ne saisissent pas l'organisation spatiale à l'échelle régionale. Ce point augmente le temps nécessaire à une affectation régionale et réduit l'avantage de faible coût de la méthode (Jackson, 1993). Ces évaluations à l'échelle du village se concentrent sur le contexte et les ressources locales, négligeant l'échelle régionale et les dynamiques (McCarthy et al. 2004) : l'échelle du regard, le village, fait de ce village une structure fermée et anhistorique. D'un point de vue pratique, une majorité d'agences de développement, passant progressivement des projets aux programmes, s'émancipe de cette approche locale mais cette démarche n'est pas généralisée. Le ZADA, a contrario, replace au centre de la réflexion l'échelle de rationalité des habitants de zones rurales, la région où l'on voyage et non pas le village qui n'a jamais été le « pays », l'espace de circonscription de la rationalité ;

La troisième lacune est liée aux oppositions sectorielles entre disciplines scientifiques : Le manque de dialogue entre sciences sociales et sciences "dures" est certes une tarte à la crème mais a des conséquences bien concrètes : Les outils à l'échelle de pays s'appuient généralement sur des analyses économiques et géomatiques, tandis que les outils à l'échelle de villages sont largement socio-anthropologiques. Plusieurs paradigmes et débats majeurs ne sont pas discutés en raison de ce fossé, comme la controverse Malthus/Boserup (Boserup, 1965 ; Mortimore et al. 2001). En fait, face au grand nombre de variables locales inconnues à étudier, faute de temps et d'argent, et de données locales fiables et continues disponibles (Mettrick, 1994), comme dit précédemment, nombre d'opérateurs de développement rural s'appuient d'abord sur des sources de données externes, comme la télédétection. Ces sources donnent une impression de fiabilité : elles sont précises, avec beaucoup de chiffres après la virgule, sont fréquemment mises à jour, mais elles ne fournissent que ce que l'on veut voir : des données qui fondamentalement correspondent à des variables visibles par télédétection. Elles ne justifient en rien du poids de ces variables affectant un territoire mais en pratique leur donnent une importance non justifiée au sens propre du terme : rien ne vient justifier que les variables correspondantes priment dans les dynamiques locales. A contrario, des acteurs de développement locaux (ONGs, associations...) travaillant localement, ont tendance à s'appuyer sur leurs propres informations, principalement qualitatives en raison du manque de temps et d'argent à consacrer à des enquêtes importantes et systématiques. Le contexte idéologique de ces institutions et le milieu universitaire et social de leurs agents et créanciers influencent également les points de vue de ces acteurs en ce qui concerne les questions de développement rural (Olivier de Sardan et al. 1995), ce qui peut conditionner leur définition des variables sur lesquels se concentrer. Dès lors, un outil tirant la légitimité de la sélection des variables et des contraintes sur lesquels travailler à partir de critères basés sur la perception locale se rend indépendant du grand biais souvent omis : l'attraction des producteurs d'informations, chercheurs, acteurs publics ou parapublics, pour telle ou telle thématique selon leurs intérêts, leurs idéologies ou leurs maîtrises différentes de thématiques. Une fois que la légitimité de la sélection est ainsi définie, un tel outil peut combiner les disciplines de manière appropriée et légitime et peut faciliter le comblement du fossé entre les disciplines. Plus concrètement, par le fait que certaines dynamiques sont ainsi recensées quand elles ne pouvaient pas l'être par d'autres outils, le ZADA est un détecteur de signaux faibles : on pourrait ainsi l'assimiler à un producteur de questions : Cela ne veut pas dire que ces signaux soient posés comme cruciaux dans le futur, mais simplement qu'ils constituent une série d'indicateurs qu'il serait bon de suivre dans le futur et des thématiques à envisager et à évaluer dans une démarche ultérieure.

Enfin, la dernière lacune est liée à l'information elle-même : toute dynamique locale ne vient à l'attention d'une recherche, qu'elle soit SHS ou biophysique, que par l'extérieur. A l'instar d'un entretien ouvert et sa différence avec un questionnaire, partir à la pêche des dynamiques locales est une étape primordiale au sens étymologique du terme : elle doit nécessairement constituer une première étape, en se positionnant dans le populisme méthodologique sans aller vers le populisme idéologique (Biershenk et al. 2000).

La Figure 33 illustre cette différence : la carte géomorphopédologique a différencié ce qui se voit, les plateaux, la vallée sèche et la vallée du fleuve Niger. L'enquête ZADA a fait apparaître les plateaux et les vallées comme fusionnés car constituant ensemble un paysage. Par contre, elle fait apparaître les éléments opérants de l'usage du territoire, d'une part les vallées irrigables, à peine visibles géomorphopédologiquement, où la nappe pour l'irrigation est accessible. De même, la vallée sèche du Dallol Bosso, si elle est constituée dans son ensemble de sols sableux, présente une triple différenciation nette dans l'usage : les bords de la vallée ont accès à une eau douce propice à du maraîchage, l'intérieur à une eau salée propice à de l'élevage. L'intérieur lui-même est à différencier entre amont, à l'eau chargé en natron et l'aval chargé en sel. La carte ZADA explique l'organisation du territoire ce que ne peut faire la carte géomorphologique : des céréales-élevage en général, du maraîchage possible dans les petites vallées, du maraîchage permanent sur les bords du Dallol, de l'élevage transhumant dans l'intérieur du Dallol aval, le centre de l'élevage régional dans le Dallol amont.

Cependant, la méthode d'origine n'incluait pas le recours aux SIGs et la formalisation des différentes variables recensées de manière explicite pour chaque unité spatiale. Une automatisation de la démarche et son intégration

au-delà du symbolisme des chorèmes (Houdart et al. 2005) était donc impossible comme source de variables et d'informations à utiliser dans une formalisation puis une modélisation des systèmes socio-écologiques.

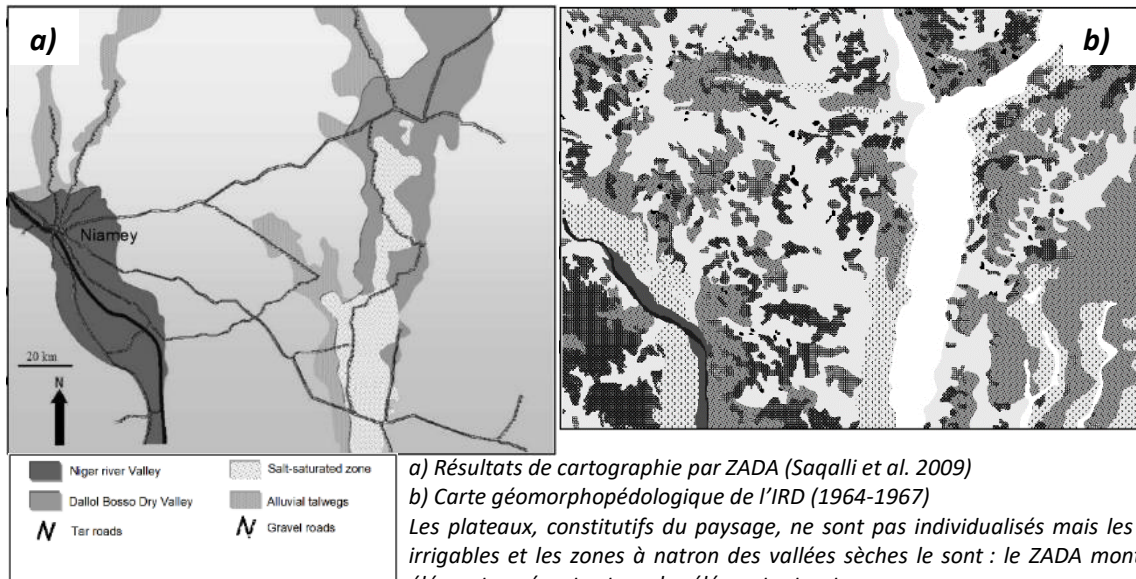


Figure 33. Pour la région du degré carré de Niamey, comparaison des résultats du ZADA et de la carte géomorphopédologique élaborée par l'IRD.

4.2.2 Méthodologie du Zonage à Dires d'Acteurs

La méthode est assez simple dans sa structure mais nécessite une certaine vigilance dans son déroulement :

1. Partons d'une carte de la zone, imprimée et aménagée pour résister aux éléments (plastification, protection, tissu). Cette carte doit être constituée de telle sorte qu'elle couvre amplement le territoire visé : le territoire cartographié dépasse le territoire étudié de près d'un tiers sur chaque côté afin de replacer le territoire dans son environnement mais aussi de le « dé-spécifier », i.e. ne pas induire de connexions entre dynamiques locales qui seraient complètement indépendantes ce qui est plus facile à voir avec un territoire plus grand (Figure 34).

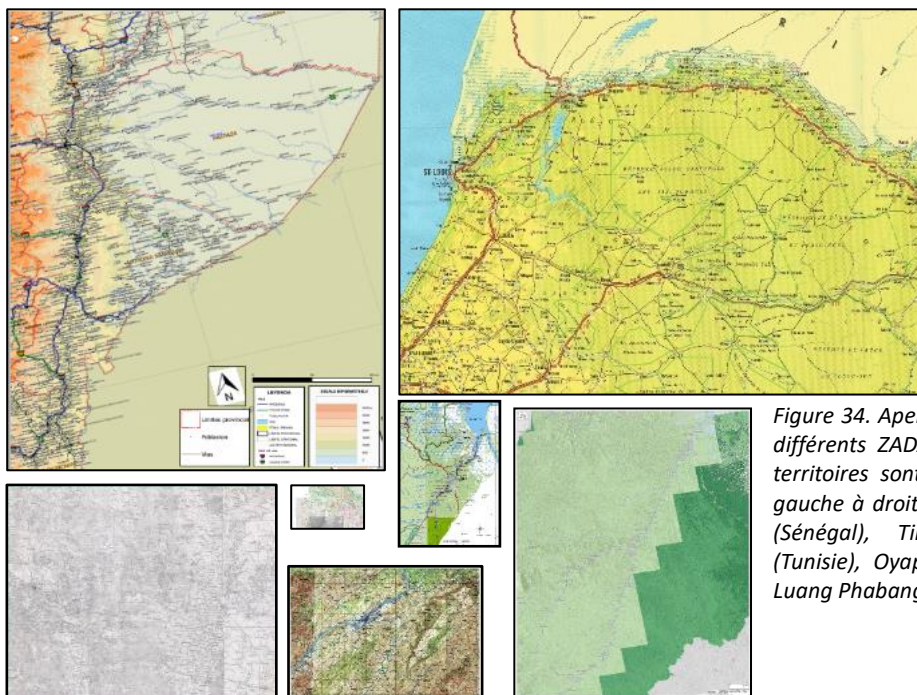


Figure 34. Aperçu des cartes de fonds pour différents ZADAs à la même échelle : les territoires sont de taille très variées. (de gauche à droite : Oriente (Equateur), Ferlo (Sénégal), Tillabéry (Niger), (Mornag (Tunisie), Oyapock aval, Oyapock amont, Luang Phabang (Laos).

2. La carte moyenne est au 100 000^{ème} mais varie du 50 000^{ème} au 200 000^{ème}. Plus précise au point de voir le parcellaire et l'on induit chez les personnes interviewées une tentative de précision dans les limites des zones à tracer qui dépasse la possibilité de définir une limite nette à des facteurs nuancés : c'est alors introduire un forçage pour une fausse connaissance, exigeant une précision géographique inappropriée quand l'exactitude de l'information donnée n'est que topologique (par exemple, une limite d'une caractéristique est globalement entre deux villages et pas plus). Plus large et l'on se rapproche des cartes nationales rappelant les cartes que tout un chacun a pu voir dans son parcours scolaire, induisant un biais cognitif où les interviewés ressortiront le résidu mémoriel de cartes retenues en classe.
3. Cette carte doit être lisible par les habitants à interviewer, et ainsi comporter beaucoup de toponymes sur divers objets géographiques (localités, routes, rivières,...) officiels ou lieux-dits locaux. Ainsi, des cartes précises spatialement issues de la télédétection sont moins pertinentes car moins riches sémantiquement. La Guyane française est ici exemplaire : c'est par le travail de recensement des toponymes faits par le parc amazonien de Guyane et le LEEISA que le ZADA a pu être fait.
4. Les refus d'être enquêté par les personnes sont nombreux : ils représentent en moyenne 50% des demandes et augmentent pour des personnes occupées (commerçant) et à statut bas dans la hiérarchie sociale (femmes, jeunes en particulier). Ces biais sont très difficilement compressibles. En moyenne, si beaucoup éprouvent des difficultés à se repérer sur la carte au début de l'entretien (et ici apparaît l'importance des amers, routes et rivières), les choses se résolvent assez vite et seul 5 à 10% des interviewés continuent à patauger dans la lecture, à se positionner même si un bon quart maintient son refus de prendre le crayon soi-même. Je n'ai pas observé de lien entre « incapacité à lire la carte » et âge ou niveau d'alphabétisation. Je dirais même que cet échec de compréhension serait d'autant plus avéré que la personne est « dans son monde », venue avec une idée, une conviction à transmettre, consciemment ou inconsciemment (besoin de projets, manque de moyens, problèmes personnels, conviction de supériorité par exemple pour les fonctionnaires locaux, etc.). Inversement, j'ai souvenir d'un jeune Foula, rencontré sur la latérite, avec lequel l'entretien ZADA sur le capot de mon véhicule puis sur une natte, fut incroyable : le jeune homme s'est d'abord déclaré analphabète puis commença, une fois défini l'orientation du papier et une distance (Zinder-Tanout), par définir un azimuth et une distance (« tel village est donc ici ?) puis proposa comme analyse trois critères qu'il lista puis dont il décrivit les 2 à 3 modalités. Il me lista ensuite, sans en omettre une seule, chacune des 18 intersections de cette grille à trois dimensions
5. La mise en place des interviews doit chercher à la fois la diversité (des statuts, des milieux, en particulier les variations de capital culturel et les sphères professionnelles donnant accès à des représentations du territoire à priori différentes : agents des eaux et forêts, chefs villageois, routiers...) et la représentativité (en particulier des sexes, quasi-systématiquement biaisé). Les lieux de sociabilité sont à privilégier : en Tunisie, les cafés sont propices mais sont quasi exclusivement masculins hors des villes et les fonctionnaires n'y vont pas. En Equateur et en Guyane, seuls les restaurants permettent de regrouper des gens d'origine diverse (agriculteurs, pétroliers), y compris des femmes mais les indigènes amazoniens et les fonctionnaires publics y sont absents. En Afrique sahélienne (Sénégal et Niger), les marchés hebdomadaires rythment les échanges cultures et sont des lieux propices. Cependant, seuls les fonctionnaires dédiés et de rares femmes (les commerçantes) y sont présents. Cette étape est cruciale et nécessite une adaptation aux pratiques culturelles locales. De même, la représentativité géographique implique un déplacement de l'équipe en place durant la campagne d'enquête, avec de préférence un temps égal pour chaque lieu et capitale locale/ou régionale, choisie pour que les sites soient aussi dispersés que possible et couvrant les différents types d'habitat (de la ville au hameau, loin/près de la route, de la rivière, etc.).
6. L'entretien se fait toujours dans la langue locale, d'où souvent la nécessité d'un interprète, avec tous les biais que cela peut impliquer. Lorsque cela est possible, les équipes se répartissent selon la maîtrise de la langue de l'interviewé. Ainsi, par exemple, avec un éleveur, c'est mon collègue A. H. Diallo qui interviewe, en Foulani, et je prenais les notes et inversement lorsqu'on interviewait un fonctionnaire venu de Dakar.

La cartographie se fait de préférence en interviewant simultanément deux personnes en même temps, et ayant des domaines de connaissance et des positions sociales différentes et, si possible, qui ne se connaissent pas, afin de limiter les conflits de statut ou la domination fondée sur le sexe, l'âge ou d'autres questions sociales. Les résultats dépendent très fortement de leur volonté de participer à la discussion et de la capacité des enquêteurs à limiter l'influence des rapports de domination sociale. La méthodologie est résumée dans la Figure 35.

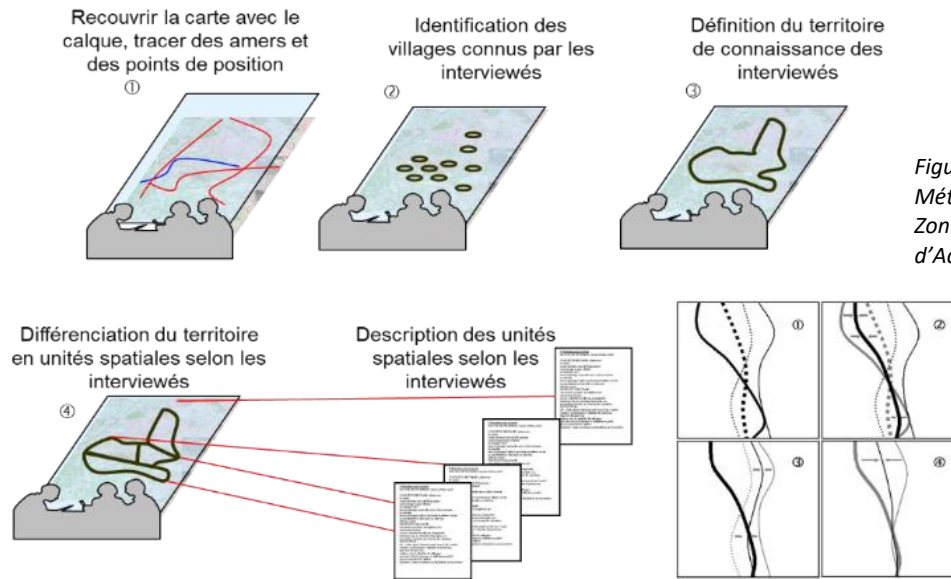


Figure 35. Méthodologie du Zonage à Dires d'Acteurs.

L'entretien commence par l'accroche du calque sur la carte et la remise de crayons aux deux personnes interrogées. On commence par identifier le domaine spatial de connaissance des deux interviewés, en cerclant les villages qu'elles reconnaissent, c'est-à-dire le territoire que le villageois peut décrire en fonction de son domaine d'activité. On part du lieu de l'entretien, le positionnant ainsi sur la carte, puis on s'éloigne radialement, cerclant ou barrant les lieux connus et inconnus. On obtient ainsi une zone qu'on rend bien visible sur le calque par des limites nettes à l'intérieur desquelles sera réalisé la cartographie : on évite ainsi de questionner sur des territoires qu'aucun des interviewés ne connaît.

La deuxième étape consiste à diviser le territoire circonscrit en unités. Une seule question, volontairement « stupide » et surtout dénuée de biais, est posée : « concernant tel thème, est-ce partout pareil ? », suggérant que les différences à rechercher sont spatiales et spatialisables. Ces unités peuvent comprendre différentes entité prises comme un tout (par exemple un ensemble plateaux/ plaines), mais cette combinaison doit être un système homogène d'utilisation et de connaissance (Lewis & Sheppard, 2005), comme au Niger, la séquence plateaux/pentes/plaines. Ces unités sont désignées Unités Spatiales Homogènes (USHs) par la suite. Seules les interviewés définissent les critères de différenciation, sans aucune suggestion de la part de l'enquêteur. L'origine de ces critères est notée, en plus des discussions et des réactions entre les interviewés (Figure 36).

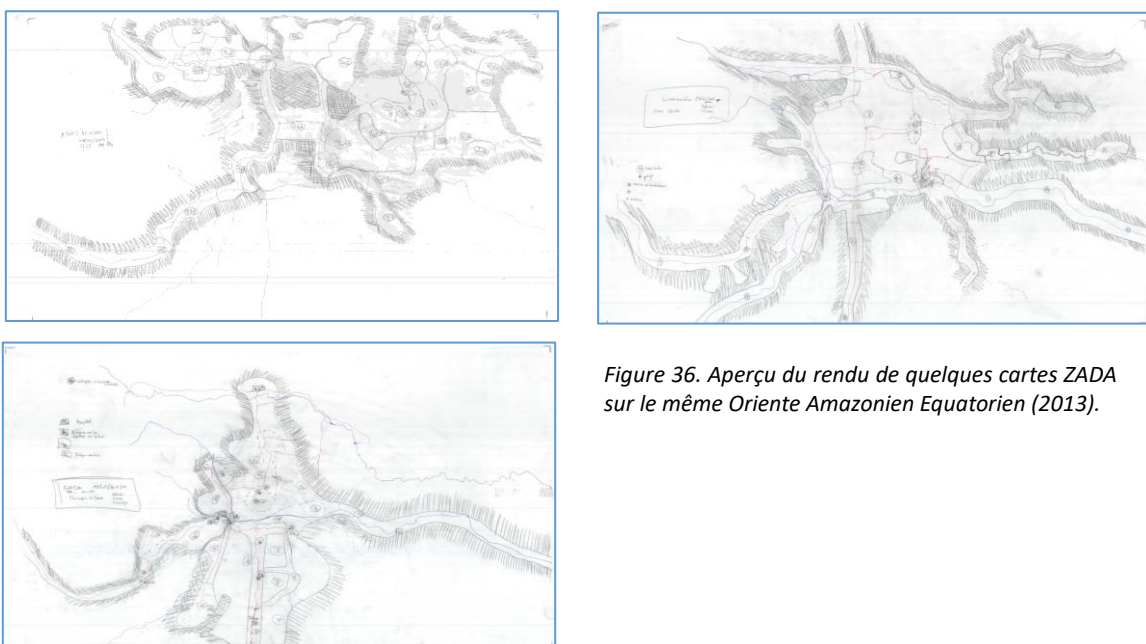


Figure 36. Aperçu du rendu de quelques cartes ZADA sur le même Oriente Amazonien Equatorien (2013).

La troisième étape voit les enquêteurs interroger les personnes pour chaque USH identifié à travers un cadre de questions factuelles : Quelles sont les infrastructures locales de l'USH (marchés, bâtiments religieux, dispensaires et hôpitaux, écoles) ? Quelles sont les principales activités économiques dans l'unité et les flux commerciaux entre celle-ci et les autres ? Quelle est la dynamique de la population vivant dans cette unité (installation et émigration) ?

L'étape finale consiste à combiner les cartes obtenues (jusqu'à 98 pour l'Equateur), i.e. faire l'intersection des polygones USH créés et combiner les informations recueillies. Dès lors que ces cartes sont obtenues, on ne peut élaborer de hiérarchie de valeur entre telle ou telle carte du fait de la plus ou moins grande connaissance, expérience d'un interviewé par rapport à un autre. D'une part, c'est surestimer nos propres capacités de diagnostic mais c'est aussi réintroduire des rapports de domination, locaux ceux-là⁴⁴, pour remplacer des rapports de domination, entre intervieweurs et interviewés, que le ZADA souhaite justement éviter.

4.2.3 Ouverture thématique, coûts faibles et généralité géographique

Le ZADA est à la collecte de champs disciplinaires ce que la modélisation est au problème du « manque de données » : il est un outil de compensation de ce manque et une ouverture sur des champs thématiques non encore identifiés. De plus, il permet d'avoir une idée, certes imprécise sur un grand nombre de champs sur un territoire régional : à notre connaissance il n'existe pas d'outils SHS permettant d'acquérir une information sur un aussi vaste territoire (jusque 100 000 km² dans le cas de l'Oriente) en aussi peu de temps. Par conséquent, c'est un outil proportionnellement très peu coûteux. Le Tableau 9 présente un comparatif avec d'autres formes d'appréhension spatialisée d'un territoire :

Tableau 9. Comparaison des méthodes du terrain et d'enquête dans le contexte du Niger pluvial

		<i>Remote sensing</i>	<i>Field measures</i>	<i>PRAs</i> ⁴⁵	<i>PBRM</i>
<i>Information sources</i>	<i>Medium</i>	<i>Satellite images</i>	<i>Field observations</i>	<i>Population assembly interviews</i>	<i>Resource & interviews person</i>
	<i>Tools</i>	<i>Image processing & GIS</i>	<i>GIS</i>	<i>None</i>	<i>GIS</i>
	<i>Topics</i>	<i>Land cover, & then Biophysics & land use</i>	<i>Biophysics & agro-ecology</i>	<i>All expressed dimensions</i>	<i>All expressed dimensions</i>
<i>Input</i>	<i>Cost</i>	<i>2 750 €¹</i>	<i>5 150 €²</i>	<i>1 330 €³</i>	<i>1 925 €⁴</i>
	<i>Required time</i>	<i>15 days</i>	<i>30 days</i>	<i>10 days</i>	<i>15 days</i>
	<i>Expertise</i>	<i>Remote sensing, biophysics & agro-ecology</i>	<i>Biophysics & agro-ecology</i>	<i>Mainly humanities</i>	<i>Mainly humanities</i>
<i>Output</i>	<i>Semantics</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Very high</i>
	<i>Topology</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Very high</i>
	<i>Spatial resolution</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Very low</i>	<i>Low</i>
	<i>Repeatability</i>	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>
<i>Study area size</i>	<i>Regional to national</i>	<i>Local</i>	<i>Local</i>	<i>Regional</i>	
<i>Quality assessment</i>	<i>Field campaigns & data correlations</i>	<i>Repetitions</i>	<i>Crosschecking within village</i>	<i>Cross-checking between maps, with external data</i>	
<i>Purpose</i>	<i>Data collection & correlation.</i>	<i>Data collection</i>	<i>Variable collection</i>	<i>Variable collection, GIS test vs. other sources,</i>	
<i>Objective</i>	<i>Science legitimacy, research oriented for decision support</i>	<i>Science legitimacy, research oriented</i>	<i>Local legitimacy, action-oriented</i>	<i>Local legitimacy. Action-oriented</i>	

¹ Average 2 images to analyze, with a cost of 1,000 € each, average minimum monthly salary 1,500 €; ² Average minimum monthly salary of a 7 persons team: 4,150 €; mission logistics & materials: 1,000 €; ³ Average minimum monthly salary of a 5 persons team: 2,650 €; mission logistics & materials: 450 €; ⁴ Average minimum monthly salary of a 5 persons team: 2,650 €; mission logistics & materials: 600 €

⁴⁴ Entre lettrés et non-lettrés, entre hommes qui parlent et femmes qui se taisent, entre anciens et jeunes les plus nombreux, entre « grandes gueules » et calmes...

⁴⁵ Participatory Research Assessments ou MARPs : Méthodes Accélérées de Recherche Participative (Chambers, 1994)

J'ai multiplié les terrains afin de tester l'outil à la limite de ses potentialités (Figure 37) :

- En terme de précision, le terrain tunisien était le plus petit territoire avec 1300km² environ (et 1500km² pour le terrain laotien), ce qui faisait que la carte au 50 000ème était à la limite de la valeur de l'outil car elle rendait visible des bordures de champs, des pâtés de maison induisant les interviewés à chercher une précision spatiale source de confusion et surdéterminant l'information. A l'inverse, les 4 campagnes en Equateur ont permis de cartographier un territoire 100 fois plus grand (130 000 km²) avec pour limite inverse d'avoir des territoires dans l'arrière-pensée forestier couvert par seulement deux ou trois cartes ;

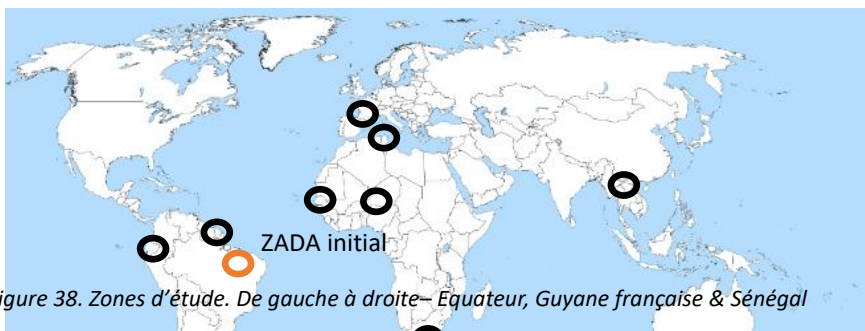


Figure 37. Distribution spatiale des enquêtes de type ZADA.

Figure 38. Zones d'étude. De gauche à droite – Equateur, Guyane française & Sénégal



- En termes de variabilité des écosystèmes, nous sommes réduits bien sûr à des territoires habités. Les zones équatoriennes à l'intérieur du parc du Yasuni connus uniquement par des chercheurs et les chasseurs Huaorani, comme les zones au nord de Tanout en bord de Ténéré, au Niger, sont les bords possibles de valeur de l'outil. L'outil est en fait stable au regard des biomes parcourus : équatorial (Oriente Equatorien, Guyane française), tropical humide (Luang Phabang, Laos), tropical sec (Caatinga brésilienne, pays Xhosa sud-africain ; Sahel nigérien, Sahel sénégalais), Méditerranéen (Mornag, Tunisie), océanique (Tarn, France). Les missions les plus récentes sont ainsi le produit des opportunités de recherche et de la tentative de diversifier les socio-écosystèmes (Figure 38) ;
- Les principaux enjeux sont dans la géographie sociale : les terrains sont pour la plupart dans des zones d'action du développement, en général des espaces de faible densité. Certes, Mornag est une banlieue de Tunis, Mdantsane/ East-London est une ville d'1/2 million d'habitants, Luang Phabang fait 100 000 habitants et le territoire français couvert fait bien 2 millions d'habitants. En gros, l'outil fonctionne avec des échelles assez grandes pour être sûr d'intégrer des zones rurales ou périurbaines mais il reste à tester en zone urbaine.

4.2.4 ZADA : vers une amélioration de la méthodologie et de ses usages

Le Tableau 10 retrace l'évolution de notre démarche : si le protocole est resté stable pour ce qui concerne le terrain, la gestion de l'information a fortement évolué. En effet, l'acquisition de l'information sur le terrain doit rester fixe car la combinaison du caractère ouvert de l'entretien et du format strict du recueil de l'information spatialisée constitue le point focal de la démarche. Par contre, la transposition de l'information peut être améliorée comme la fusion des différentes cartes.

Les travaux de Doryan Kaced, doctorant que je co-encadre avec B. Gaudou, ont entre autres porté sur cet aspect : il s'agissait de faciliter la gestion de l'information sur plusieurs points comme autant d'étapes progressives vers l'automatisation :

Tableau 10. Évolutions de l'outil ZADA au long des utilisations : adaptations aux contextes, aux questions de recherche et intégration d'innovations de traitement des données

		Contexte	Problématique	Résultats	Modifications
1	<i>Brésil, 1996 (Bonin et al. 2001)</i>	Nordeste : Milieu pastoral en colonisation	Partage des terres d'élevage	Rapports de force entre acteurs pour les terres	Méthode de base : 1 seule question ouverte
2	<i>Afrique du Sud, 1998 (Saqalli, 1998) ;</i>	Ciskei Post-apartheid, entre bantoustan et ville blanche	Réintégration du bantoustan par les bassins d'emploi	Axe « utile » de 30km de diamètre en connexion, zones rurales	Méthode terrain & traitement de 1. Recours à des traducteurs
3	<i>Niger 2005 & 2006 (Saqalli et al. 2009) ;</i>	Sahel rural	Etat des lieux environnementa l	Structuration nord-sud et radiale autour des villes	Méthode terrain & traitement de 1. Recours à des traducteurs
4	<i>Laos, 2012 (Saqalli et al. 2015) ;</i>	Luang Phabang, contraste entre ville développée et montagnes	Inégalités de développement, environnement eau, et santé	Lien turbidité rivières et maladies pas clair, urbanisation gérée	2 campagnes : Environnement Santé Méthode traitement de 1.
5	<i>Equateur, 2013 à 2016 (Maestripiéri et al. 2016)</i>	Amazonie pétrolière. Déforestation, agriculture, pollution	Perception du risque pétrolier et des autres enjeux	Pétrole & autres risques placés, contrastes agricoles forts	Méthode terrain de 1. Recours aux SIG ; Données et fusions manuelles Recours à des traducteurs
6	<i>Tunisie 2014 (Saqalli et al. 2020)</i>	Plaine agricole intensive de Mornag et terrils miniers de plomb	Perception du risque minier et des autres enjeux	Risques minier & autres risques placés, contrastes agricoles forts	Question centrée sur environnement. Recours aux SIG ; Données et fusions informatisées Recours à des traducteurs pour certaines personnes
7	<i>Tarn 2017, 2018 & 2019</i>	« Pays de cocagne », Albi et Toulouse public : étudiants M2 GSE-VRT	Différents usages, espaces agricoles et distinction villes-rural	Structuration de pays avec productions AOC et zones de grandes cultures « par défaut »	Questions ouvertes, allant vers agricultures Méthode terrain & traitement de 1, faits en salle de cours
8	<i>Guyane française 2017 & 2018 (Saqalli et al. 2019)</i>	Bassin frontalier contrasté amont-aval	Différences usages, migrations brésiliennes et orpaillage	Territoires chasse, pêche, orpaillage ; urbanisation	Méthode terrain de 1 Méthode traitement de 6 Recours à des traducteurs pour certains sites
9	<i>Sénégal 2018 (Saqalli et al. 2020 soumis)</i>	« Désert » du Ferlo	Transhumance, irrigation et colonisation humaine	Déplacement vers le sud, pénurie cachée de pâturages (supplémentation)	Méthode terrain de 1 Méthode traitement de 6, systématisée et automatisée Recours à des traducteurs pour certains sites

- Spatialement, le ZADA avait pour avantage une grande exactitude topologique et gérait bien l'incertitude inhérente à une information qualitative qu'un interviewé se représente : on ne voit pas une limite entre deux villages, on voit que ces villages sont différents et la limite est une représentation de cette différence. Les premières étapes indiquées sur le Tableau 10, lancées avant cette thèse, ont permis de transposer le travail du calque au SIG, favorisant une meilleure qualité de transposition spatiale. Doryan Kaced a amélioré la précision spatiale de la combinaison de cette limite floue, en automatisant et formalisant les intersections des USHs et en posant des seuils de combinaison de polygones créés : c'est ainsi gérer le flou spatial incontournable dans la combinaison d'unités spatiales (Kaced et al. *En chantier*) ;
- Sur le plan ontologique au sens de la gestion de l'information, les premières étapes indiquées sur le Tableau 10, lancées avant la thèse de Kaced, ont également permis de transposer l'information sur SIG, accentuant paradoxalement considérablement le temps de travail nécessaire à la fusion des cartes. Un seuil technique apparaissait alors : une limite de temps dans la capacité à fusionner de grands corpus de cartes ZADA. La

grande part des travaux de Kaced porte sur la formalisation de la gestion de l'information, par essence qualitative pour assurer une combinaison sans perte ni confusion (Kaced et al. *En chantier*) : une première étape d'harmonisation lexicale, formalisant mieux les ontologies ainsi créées, a permis ensuite la création d'une interface d'appui aux thématiciens pour la caractérisation de chacune des ontologies. Quelques exemples de questionnements : Comment valoriser au mieux l'information sans en sur-crée ? Faut-il créer deux variables (land use et land cover) pour valoriser les vocables villes, champs, routes qui sont à la fois l'un et l'autre ? Comment reconnaître, sous le même vocable d'usage des terres ce qui, sur une carte a été classifié de bien à mauvais, sur une autre d'un véritable usage (champs, ville, routes...) et sur une autre ce qui relève du relief (collines, vallée, etc.) ? Comment combiner sans hiérarchiser de manière figée des classifications lourdes de sens comme « ethnies » : ainsi, Teko ou Wayãpi sont-ils des sous-catégories de « amérindiens », elle-même une catégorie de « Guyanais », elle-même une catégorie de « français » ? Ces questions sont loin d'être triviales en termes de gestion de la complexité, de réduction de l'introduction de trames extérieures au terrain et donc de gestion de la subjectivité en différenciant la subjectivité locale, à garder, de l'extérieure, à réduire. De plus, c'est la seule manière d'envisager de combiner des corpus de cartes supérieurs à 100 cartes, limite vécue de la possibilité pour un humain de combiner à la main ces informations. Il s'agit donc d'envisager à long terme atteindre une vraie valeur statistique dans la gestion de cette information anthropologique qualitative.

- Enfin, le ZADA peut être envisagé comme une source d'information à intégrer dans les modélisations à base d'agents ou SMA : En effet, ceux-ci définissent la rationalité des agents le plus souvent selon le modèle BDI (Belief-Desire-Intention) : les choix et objectifs (Desire), à partir desquels seront définis les plans d'actions (Intention) sont construits sur des croyances et des rationalités combinées à des informations, qualitatives ou quantitatives. Le plus souvent, les modèles intègrent, comme informations spatialisées accessibles par les agents, les mêmes couches SIG utilisées pour construire le territoire : il n'y a pas de biais ni de qualité ni de quantité d'information pour l'agent moyen qui aurait ainsi une information parfaite. Or, le biais d'asymétrie d'information est un des plus importants que l'on puisse rencontrer sur le terrain : tout le monde n'a pas accès à la même information sur le territoire. Intégrer les ZADA et mieux encore à l'avenir des ZADAs différentiels (selon les catégories d'acteurs) comme étant les couches d'information auxquels ont accès les agents serait une bonne manière de simuler ces biais et différences dans les modèles. Mieux encore, en faisant en sorte que ces connaissances, basées à l'initiation des modèles sur les ZADAs, évoluent au fur et à mesure des échanges et rencontres entre agents avec le réel et entre eux, reproduirait la progressive accumulation de l'expérience des nouveaux colons sur leur territoire. Ainsi, par exemple, la carte des sols d'un agent serait par défaut celle du ZADA de sa catégorie sociale et changerait pour chaque pixel que cet agent parcourrait. Cette carte pourrait être mise à jour selon la probabilité d'interaction selon le type de personnes : on comprendrait alors pourquoi un agriculteur homme et commerçant, deux facteurs favorisant socialement les interactions, accumule de l'information sur un territoire plus rapidement et facilement qu'une femme agricultrice vivrière. On reconstitue ainsi le biais d'asymétrie d'information et l'acquisition d'expérience différentielle selon les agents (y compris les biais sociaux d'accès à l'information : le ZADA est ainsi une mine d'information pour les modélisations sociales spatialisées).

4.2.5 Pluralité des utilisations des résultats du ZADA

On obtient ainsi un outil se formalisant progressivement dans sa démarche d'analyse des données de terrain, renforçant sa totipotence pour pouvoir couvrir des terrains et des thématiques variées. Plusieurs terrains ont été abordés sur cette longue période en Pays du Sud :

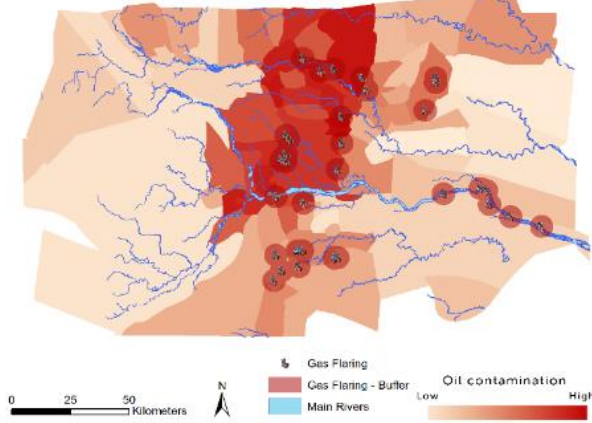
Les résultats sont ceux passant par la méthode ZADA, de l'analyse des systèmes agraires et de l'utilisation du territoire et en particulier sa reconstitution historique. Cela permet non seulement de retracer l'histoire et les tendances affectant un territoire mais aussi d'y chercher les faits saillants qui ne s'expliqueront pas par les interactions locales (et qui devront y être intégrés comme actions *deus ex machina*, comme les prix ou la démographie comme dit plus tôt).

Les ZADA contribuent à cette compréhension, comme en Equateur où les usages plus que les désignations ethniques, définissent les lignes de clivage par lesquels les habitants se constituent et se voient. Elle permet même de valider certaines dynamiques de contamination comme en Tunisie pour la contamination du plomb,

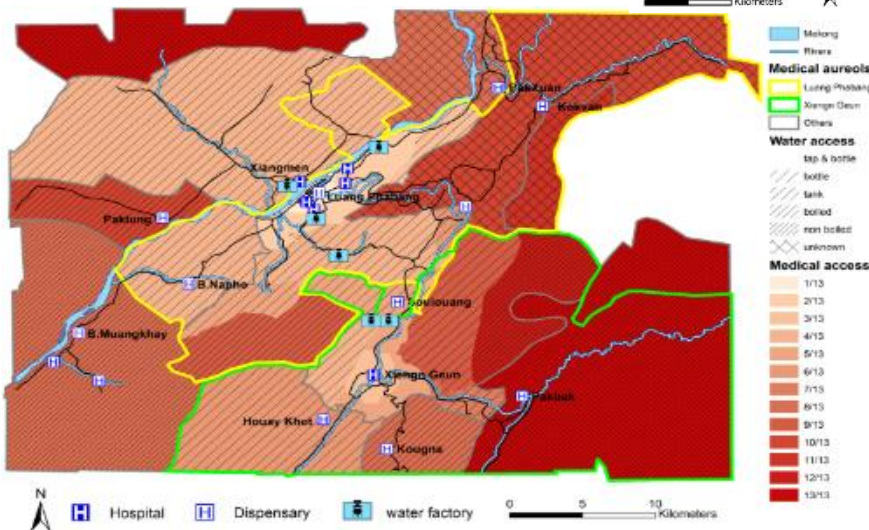
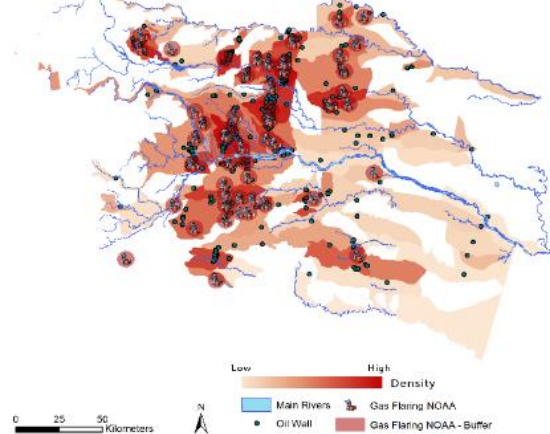
des effluents azotés et des produits phytosanitaires et toujours en Equateur pour le pétrole et les déchets miniers lorsqu'on les compare aux reconstitutions sur base SIG (Figure 39a réalisée par ZADA et Figure 39b compilant les zones d'incidents pétroliers pour les zones connues et les sites pétroliers pour les zones sans données de fuites pétrolières et leur densité par bassins versants).

Ainsi, les résultats obtenus lors du ZADA autour de Luang Phabang au Laos montrent que, plus que l'obstacle physique qu'est la montagne, c'est l'inaccessibilité aux infrastructures sanitaires et d'épuration qui caractérise

a). Perception de la contamination par le pétrole dans les provinces d'Orellana et de Sucumbios (Equateur)



b). Estimation de la contamination par le pétrole selon le nombre de puits et les volumes projetés sur les bassins versants des provinces d'Orellana & Sucumbios (Equateur)



c). Perception de l'accès différentiel aux services de santé et à l'eau obtenu par ZADA autour de Luang Phabang (Lao PDR)

d). Perception de l'auréole de dissémination des poussières de plomb autour des terrils de Jebel Ressass et modélisation des vents par Ghorbel et al. (2010) Tunisie.

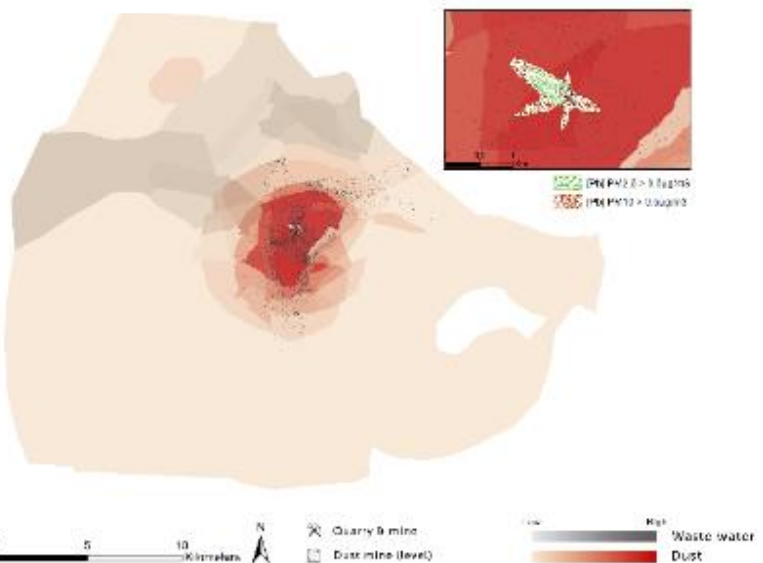


Figure 39. Perceptions de différents risques environnementaux sur trois terrains : Equateur, Laos et Tunisie

d'abord la vulnérabilité des populations rurales. Seulement, des maladies urbaines apparaissent, faisant des urbains les nouveaux vulnérables de ces territoires. Cela est renforcé par l'approche pragmatique du gouvernement pour fournir de l'eau potable au plus de monde possible, reprenant pour l'eau ce que le réseau téléphonique a apporté pour la couverture cellulaire. Le gouvernement laotien a donné agrément à des entreprises d'embouteillage d'eau potable, à charge pour elles de disséminer/généraliser la distribution des grands bidons de 45 l dans quasiment toutes les zones rurales, via différents moyens de transport, en particulier les motocyclettes tricyles appelées Tuk-Tuk, quasiment un emblème national. Cette distribution a ainsi de fait coupé pour une grande part le lien entre eaux sales et maladies (Figure 39c).

De même, en Tunisie, des enquêtes ZADA ont été réalisées dans la plaine de Mornag, au pied du Jebel Ressas où l'exploitation de plomb sur un demi-siècle a laissé des terrils plombifères d'au moins un million de m³. La modélisation physique de la dissémination de polluants par les vents est sous-estimée car n'intégrant pas les rafales (Ghorbel et al. 2010). Nos ZADAS ont produit une estimation de l'auréole de dispersion maximale des poussières, combinant plomb et poussières de la carrière-cimenterie e à proximité.

Ils suggèrent également qu'il n'y a pas une, mais plusieurs aléas prioritaires, leur superposition définissant alors une autre zone que celle centrée sur Jebel Ressas comme particulièrement exposée. Cette zone combine ainsi poussières des terrils de plomb, poussière fine issue de la carrière-cimenterie, épandage de produits phytosanitaires sur des oliveraies intensives, contamination en nitrates venue des eaux usées issues de terres agricoles septentrionales qui sert d'eau d'irrigation et enfin déchets ménagers qui s'entassent car non ramassés ! Ainsi, le ZADA comble une lacune théorique et pratique, celle de la justification par les chercheurs en sciences biophysiques des variables étudiées, justification qui se résume souvent dans l'article produit par des « de tout temps... », ou des « il est bien connu » résumant l'intérêt à « c'est important » quand on devrait, pour une véritable opérationnalité, justifier une hiérarchie : « ceci est plus important que d'autres choses » (Figure 39d).

En Equateur, le ZADA fait apparaître un Orienté « utile » (Figure 40d): la zone centrale du territoire étudié est unanimement vue comme portant de bons sols et sont effectivement, selon la carte pédologique, le seul endroit dominé par des sables d'origine volcanique, bien mieux drainant que les sols latéritiques alentour et à la capacité d'échange cationique bien meilleure. Or, cette donnée pédologique s'avère se superposer par coïncidence avec les champs pétroliers. La disposition de ceux-ci a défini le tracé des routes et le choix des agglomérations à développer par les compagnies pétrolières et par là, le niveau de couvertures en infrastructures. Il s'ensuit que les contrastes se renforcent, les zones de forte production pétrolière (donc des emplois dans la principale industrie locale, celle du pétrole), de bonne couverture en infrastructures sociales et où l'agriculture est rentable (bassins de consommation à proximité, accessibilité meilleure, bons sols) sont les mêmes (Figure 40b).

Inversement, la Figure 40a montre où, pour un public très majoritairement non-indigène, vivent les indigènes et la Figure 40c, là où il y a des « problèmes » avec eux. En creux est ainsi indiqué où la présence indigène n'est pas reconnue, c'est-à-dire en dehors des parcs vus comme « dédiés » à ce but. On ne montre pas seulement un instantané de la perception du territoire mais on peut ainsi identifier certaines dynamiques socio-écologiques et certaines tensions politiques probables.

La question est ici le formalisme : comment à partir de cette légitimité issue du populisme méthodologique (Olivier de Sardan, 2003a) construire un formalisme mettant à plat et en regard des dynamiques à la fois sociales et environnementales ? Il s'agit de ne pas prendre pour acquis les données recueillies (elles sont illustratives, donnent des voies d'exploration mais ne sont pas à intégrer en tant que telles sauf dans certaines conditions de représentation statistique difficiles à atteindre) mais de prendre pour acquis les variables recensées :

Non seulement elles vont ouvrir des thèmes (par exemple, il existe d'autres contaminations en Tunisie), mais elles vont définir les rationalités locales : la population définit ces variables comme légitimes et ce sont ces critères qui définissent a priori les tenants des rationalités locales. Il est donc légitime de les considérer pour le *Belief* des modèles informatiques BDI (Belief-Desire-Intention) : on peut ainsi l'assimiler à la vision du monde qu'ont les acteurs. Une fois conceptualisés par ces enquêtes sociologiques et économiques, virtualisés comme entités informatiques dans un modèle, on peut ici rendre compte de ce qui est en général vu dans de nombreux modèles socio-écologiques comme la boîte noire de la « culture », des logiques sociales ou spatiales non liées à une rationalité économique. C'est ainsi dans son intégration dans une démarche globale de recherche formelle sur

les territoires et les SSERs que réside l'apport le plus utile de cet outil. La section suivante présente ainsi cette démarche globale dans laquelle va s'insérer le ZADA.

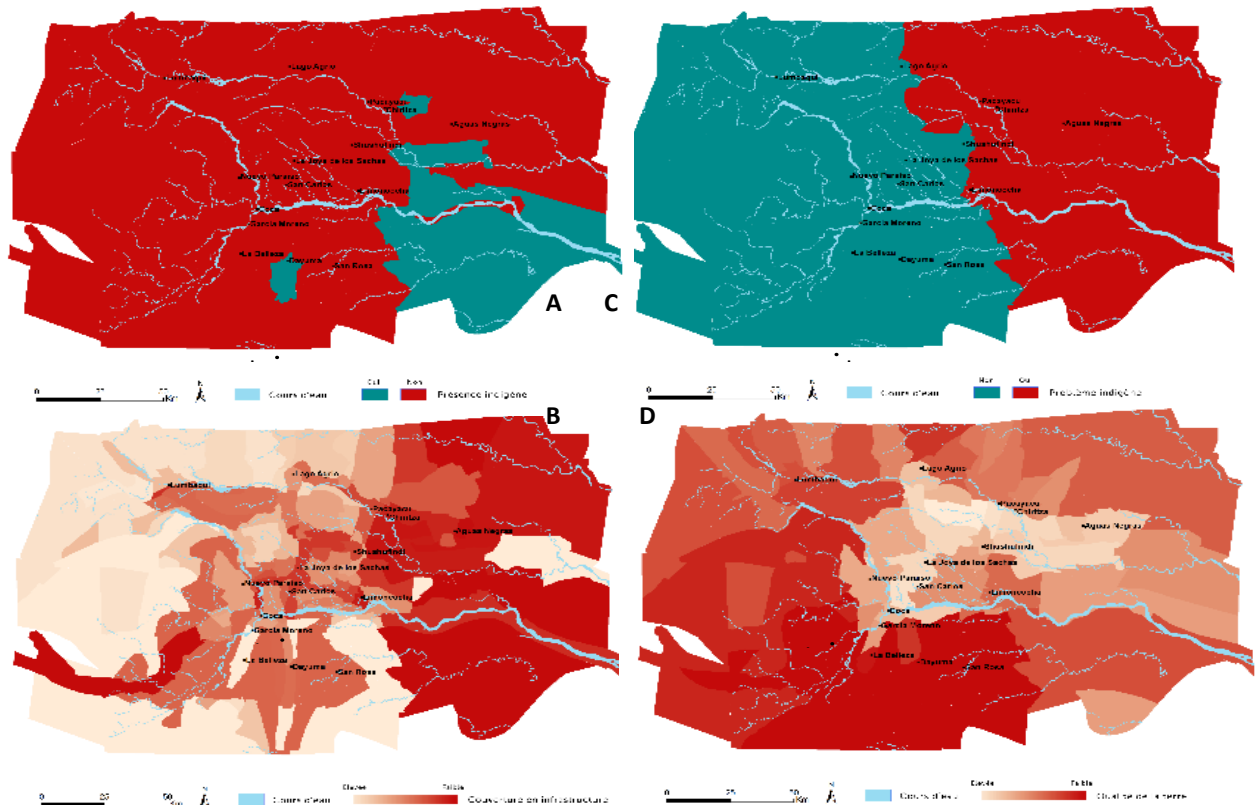


Figure 40. Résultats du ZADA en Amazonie Equatorienne nord : a) Présence perçue des indigènes par les non-indigènes ; b) Perception de la qualité de la couverture en infrastructures c) Perception par les non-

Saqalli M., Diallo Hamath A., Kaced D., Belem M., Iopue R., Moussa Y., Ducourneau A., Gaudou B. Cartographie sémantique par zonage à dire d'acteurs : Le Ferlo (Sénégal) et ses alentours (Sénégal). *Vertigo* (soumis)

Saqalli M., Hamrita A., Maestripiéri N., Boussetta A., Rejeb H., Mata Olmo R., Kassouk Z., Belem M., Saenz M., Mouri H. 2020. "Not seen, not considered": An evaluation of differential perceptions of environmental risks using Perception-Based Regional Mapping: the case of heavy metal dispersion extent in the Plain of Mornag facing old plumb mine spoil tips of Jebel Ressas (Tunisia). *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 5, 30. <https://doi.org/10.1007>

Saqalli M., Béguet E., Maestripiéri N., de Garine E. 2020. Somos Amazonia", a new inter-indigenous identity in Ecuadorian Amazonia : beyond a tacit Jus apudia of ecological origin ? *Perspectiva Geográfica*, 25, 1.

Saqalli, M. 2020. Une mosaïque de nuisances et de contaminations en Tunisie. *Atlas des Nouveaux mondes*, Paris, France. INSU MISTRALS SICMED www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/mediterranee-une-mosaïque-de-nuisances-et-de-contaminations.

Rojas Cifuentes C., Maire E., Fozzani J., Davy D., dos Santos Alves M. J., **Saqalli M.** 2018. Pluris Homo Potamos : Enjeux socio-économiques et environnementaux autour du fleuve Oyapock : Premiers apports de la méthode de cartographie ZADA (Zonage A Dires d'Acteurs). Colloque Circulations, frontières et villes dans les Guyanes. 08-09/11/2018. Université de Guyane, Cayenne, France. <http://www.driihm.fr/actus/actus-generales/367-appel-a-communication-circulations-frontieres-et-villes-dans-les-guyanes>

Saqalli M., Méjean R., de Meyer C. 2018. Algunos resultados de las cartografías con actores (CADA) realizadas en el territorio del Oriente. Restitución Programa MONOIL, 28/04/2018. Universidad Estatal Amazónica de Puyo, Equateur.

Saqalli M., Fozzani J., Maire E., Lerigoleur É., Davy D., Dos Santos Alves M. J., Rojas Cifuentes C. 2018. FEZOAD1 et 2 : Premiers apports de la méthode de cartographie à dire d'acteurs ZADA autour du fleuve Oyapock. Séminaire restitution OHM Oyapock 06/12/2018, Cayenne, France. <http://www.driihm.fr/actus/actus-du-reseau/379-9eme-seminaire-de-restitution-de-l-ohm-oyapock>

Diallo A. H., **Saqalli M.** 2018. FERLOZAD : Le Zonage à Dires d'Acteurs, un outil de diagnostic et d'analyse des interactions entre Hommes et Territoire. Séminaire restitution OHM Tessékéré, 05-06/11/2018. Dakar, Sénégal. <http://www.driihm.fr/agenda-driihm/123-seminaire-annuel-de-restitution-de-l-ohmi-tessekere-2>

Saqalli M., Maestripiéri N., Jourden M., Saenz M., Maire E. 2018. Spatialiser un risque environnemental via les perceptions locales : Une démarche, trois terrains (Equateur, Tunisie, Laos). In : M. Gaille. *Pathologies environnementale : Identifier, comprendre, agir*. Chap. 2 77-112. CNRS Editions. Paris,

Saqalli M., Maestriperi N., Lerigoleur E., Gil E., Bosque S., Morin L. 2017. Cartographie des perceptions du territoire amazonien : importance perçue des activités pétrolières. In : Becerra S., Maurice L. « Bien vivre » avec les activités pétrolières en Equateur/“Buen vivir” con las actividades petroleras en el Ecuador 12-15.

Maestriperi N., **Saqalli M.** 2016. Assessing Health Risk Using Regional Mappings Based on Local Perceptions: A Comparative Study of Three Different Hazards. *Human and Ecological Risk Assessment Journal*, 22, 3, 721-735.

Saqalli M., Jourden M., Maestriperi N., Guillaume S., Maire, E., Souleuth B., Latsachach K., Sounyafong P., Louy Tammahuxsa L., Sengtaheuanghong O., Ribolzi O., Becerra S. Backward waters, modern waters: Spatializing territory uses and water-related sanitary stakes through regional mappings based on the perceptions of local stakeholders in the area around Luang Phabang (Lao PDR), *Applied Geography*, 60, 184-193.

Boussetta, A., **Saqalli M.**, Maestriperi, N., Rejeb, H. 2015. Le zonage à dire d'acteurs un outil en faveur de l'éco-paysage : Mornag et Jebel Ressas. In : Rejeb, H. (éd.). *Alternatives éco paysagères dans les régions méditerranéennes*. Ouvrage Interuniversitaire transdisciplinaire Editions ISA Chott-Meriem.

Boussetta A., **Saqalli M.**, Maestriperi N., Rejeb H. 2015. Le zonage à dire d'acteurs, un outil en faveur de l'éco-paysage de la zone de Mornag- Jebel Ressas. Conférence SAGEO, Hammamet, Tunisie, 11/2015.

Boussetta A., Saqalli M., Maestriperi N., Rejeb H. 2015. Ruralité et systèmes de productions : Une approche géographique par les Zonages à Dires d'Acteurs (ZADAs). Conférence Alternatives Ecopaysagères, Sousse, Tunisie. 05/2015.

Maestriperi N., **Saqalli M.**, Becerra S., Munoz M., Ribolzi O. 2014. Assessing a health risk thanks to regional mappings based on local perceptions: A comparative study of three different hazards in three sites: Laos, Tunisia and Ecuador. 3rd International Congress on Environmental Health (ICEH2014), Porto, Portugal, 25/09/2014.

Saqalli M. 2014. le Zonage à Dires d'Acteurs, un outil de cartographie basé sur la perception locale : présentation et usages. Séminaire PEPS SOLIDER Atelier 2, Université Paris Diderot, Paris, 14/02/2014

Saqalli M., Jourden M., Maestriperi, N., Guillaume S., Maire, E., Souleuth B., Latsachach K., Sounyafong P., Thammahuxsa L. C., Sengtaheuanghong O., Ribolzi, O., Becerra S. 2013. Backward waters, modern waters: Spatializing territory uses and water-related sanitary stakes through regional mappings based on the perceptions of local stakeholders in the area around Luang Phabang (Lao PDR). Conférence Interactions Politiques publiques, dynamiques environnementales et pratiques sociales, Uté Toulouse 2 Jean Jaurès, France, 06/2013.

Saqalli M., Mouri H., Becerra S., Munoz M., Abdessamad I., Touati M. 2013. Le Zonage à Dires d'Acteurs, un outil de diagnostic et d'analyse des interactions entre Hommes et Territoire : Perception des risques de contamination autour du Jebel Ressas. Séminaire annuel Programme MISTRALS SICMED COMETES, Sousse, Tunisie, 29/10/2013.

Saqalli M., Caron P., Defourny P., Issaka A. 2009. The PBRM (perception-based regional mapping): A spatial method to support regional development initiatives. *Applied Geography*, 29, 358-370.

Saqalli M. 2005. Du terrain au modèle : enquêtes et modélisation des activités et des dynamiques de la population d'un village du Niger. 25/05/2005 Séminaire Université Catholique de Louvain MILA, Louvain-la-Neuve, Belgique

Saqalli M. 2005. Le zonage à dire d'acteurs Méthodologie et Résultats. Séminaire 15/11/2005 Séminaire Université Catholique de Louvain MILA, Louvain-la-Neuve, Belgique

Saqalli M. 1998. Gestion des ressources et analyse des systèmes d'élevage sur les districts de Kambashe et Imiqhayi, ex-bantoustan du Ciskei, Eastern Cape, Afrique du sud. CIRAD-TERA/ ARC/ Fort Hare Uty, Mémoire Paris 1 Panthéon Sorbonne IEDES –INA-PG.

Figure 41. Photographies de Zonages à Dires d'Acteurs sur différents terrains, dans l'ordre chronologique



Au nord-est de Zinder, Niger, 2005



Au nord de Luang Phabang, Laos, 2012



Plaine de Mornag, Tunisie 2013



A l'ouest de Dayuma, Equateur, 2014



Au sud de Tena, Equateur, 2016



Protection artisanale des cartes, Sur le Rio Zamora, Equateur, 2016



Village au nord de St-Georges (de l'Oyapock) 2017



Marché en bord de Fleuve Sénégal, Sénégal, 2018

106 Tant que faire se peut, les images sont choisies afin de montrer le minimum de visages. Les photos de ZADA sont celles qui s'y prêtent le moins.

5 Modéliser : une démarche de recherche

5.1 MASSE : Modélisation Multi-Agent Spatialisée des Socio-Ecosystèmes

5.1.1 Construire une méthodologie interdisciplinaire empirique à partir de terrains variés

Elinor Ostrom (1990), prix de la banque de Suède dit « Nobel » d'économie 2009, a accumulé près de mille cas d'étude de conflits autour de ressources naturelles avant de proposer une théorie institutionnaliste souple pour les formaliser. Elle considérait même que cette étape était primordiale au sens étymologique du terme, à lancer en premier afin d'accumuler les expériences et les terrains. Ce travail illustre le fait qu'une approche descendante, globale qui s'appliquerait sur divers cas, ne peut s'envisager directement.

Confronté aux difficultés de l'interdisciplinarité et à l'émergence des besoins et travaux en modélisation sociale pour des groupes de recherche forts différents, paléoenvironnementalistes, archéologues, géographes, socio-anthropologues, agronomes et écologues, j'ai choisi d'orienter mes travaux vers des développements méthodologiques. Bien conscient qu'une tentative d'universalité serait illusoire car amenant à trop de généralités non discriminantes, je souhaite formaliser cette recherche sur les territoires ruraux selon des thématiques locales. Ces thématiques variées sont aussi importantes les unes que les autres : pénuries (eau dans le bassin Adour-Garonne, fertilité et eau au Sahel), altérations (contaminations en Orient ou dans la plaine de Mornag en Tunisie, déforestation en Orient et en Guyane française), dynamiques agraires et démographiques (expansion agricole en Orient, au Sahel, au Néolithique en Europe), transformations sociales (vieillesse dans le bassin Adour-Garonne, organisations familiales au Sahel) ou autres (changement climatique, pénurie...). Je privilégie une démarche empirique, par la comparaison de plusieurs sites locaux appartenant au même bassin d'étude, archéologique ou actuel, en lien avec le bassin régional correspondant. Pour plus de généralité, il s'agit d'explorer plusieurs bassins régionaux. Pour plus de richesse, ces bassins régionaux de recherche doivent être différents pour pouvoir s'enrichir mutuellement. Mais comment étendre une démarche à des terrains et des problématiques variées ?

1. *Le recours à la comparaison des avantages et des contraintes pratiques.* Pour un même environnement, il existe et a existé de nombreux systèmes d'usages des ressources naturelles possibles. Sur l'Europe même, on est passé d'un système chasse-cueillette au modèle agricole LBK pour l'Europe du Nord, puis éventuellement des systèmes pastoraux associés à de la culture itinérante puis un système biennal puis triennal pour passer à un système sans jachère et à culture fourragères avant d'arriver à une agriculture mécanisée puis motorisée avec intrants. En terme agronomique, de nombreux systèmes agraires différents, avec des performances très variables, pour des raisons d'organisation sociale et de système économique, peuvent fonctionner (et coexister) quelquefois avec les mêmes outils techniques et vivants (animaux élevés, végétaux cultivés). Ils apportent ainsi par inférence une « bibliothèque » de schémas de pratiques agropastorales qui enrichissent la réflexion sur les pratiques passées, présentes et potentielles. Cette incroyable variabilité des modes d'utilisation des mêmes ressources naturelles et du même écosystème est cependant conditionnée par les contraintes pratiques et physiques de l'agriculture, que l'agronomie et l'économie des systèmes agraires peut décrire, permet de lister différents systèmes de production et leurs variations mais aussi différents indicateurs de « performance » :
 - a. Le rendement agricole à l'hectare est souvent celui le plus facilement cité mais rarement le plus pertinent. On ira chercher la productivité à la ressource la plus rare, la plupart du temps la productivité du travail dans des systèmes extensifs (mais aussi les systèmes motorisés actuels) : Ainsi, on suggère des pratiques extensives, optimisatrices de la main d'œuvre, lorsque cette dernière est la ressource la plus rare ;
 - b. On pourra envisager des indicateurs de sécurisation comme la stabilité de la production dans des années mauvaises, comme par exemple la stabilité des récoltes en cas de sécheresse qui justifie l'utilisation par les villageois des variétés locales de mil au Sahel, plus stables en cas de sécheresse. Par exemple, pour des espaces extensifs, des troupeaux de petits ruminants sont moins risqués (perte plus faible par tête, animaux plus robustes) mais au-delà d'un certain seuil de gestion, les besoins en main d'œuvre sont plus importants qu'avec des bovins : ils sont donc utiles dans des systèmes avec beaucoup d'enfants. Cela peut aussi permettre de comparer des pratiques de fertilité par les besoins différents en main d'œuvre et en

maintien des cendres fertiles face au ruissellement : Faut-il dans des systèmes de défriche-brûlis privilégier la défriche puis le brûlis des souches ou au contraire brûler puis dessoucher ? cela dépend des risques de pluies locales, de la rapidité des cycles de croissance mais aussi des disponibilités en main d'œuvre.

- c. On peut également envisager des indicateurs conjoints incluant des effets d'entraînement et de synergie entre cultures (Dupraz & Liagre, 2008) ou même cycles culturels : telle production peut être plus pratique car elle ne rentre pas en compétition de calendrier avec telle culture ou amène de l'azote (pour les légumineuses) pour telle autre. On obtient ainsi un assez large panel d'indicateurs pour comparer entre eux les différents systèmes de production possibles sur un territoire ;
2. *Le terrain comme sélectionneur d'indicateurs pertinents* : Parmi tous ces systèmes SSER possibles, ce sont les enquêtes de terrain qui "choisissent", discriminent ces différentes possibilités. En particulier, ce seront les entretiens dans lesquels les agriculteurs décrivent leurs pratiques et à partir desquelles on déduit la hiérarchie de leurs contraintes, combinées aux ZADAs, qu'on pourra ainsi définir ce qui prime comme contraintes et objectifs. Quelques exemples :
- a. J'avais pu voir sur mon premier stage dans l'ex-« homeland » du Ciskei en Afrique du Sud des cheptels bovins familiaux de race locale, la race Nguni pourtant connue pour sa fertilité et sa robustesse, restant pourtant numériquement faibles et ne croissant pas. Avec l'aide de Philippe Lhoste (IEMVT expérimenté et à l'œil acéré), trois hypothèses ressortaient après avoir éliminé toutes les options possibles : un état sanitaire éradiquant la moitié des veaux, un manque de taureaux et un marché parallèle. Après enquête, les deux dernières hypothèses étaient bonnes.
 - b. Un autre exemple présente cette démarche inversée : la référence classique de tout système de production Néolithique, à faible densité démographique et sur des sols à la base fertiles, est de recourir à la culture itinérante, la plus performante au regard de la ressource la plus rare, la main d'œuvre. Or l'archéologie de la culture LBK (Bogaard 2002 ; 2004 ; Bogaard et Jones 2007) faisait apparaître qu'il était question de champs permanents, sur plusieurs décennies voire siècles. Mon raisonnement a été d'élaborer tous les systèmes permettant de maintenir la fertilité sur cette durée et plutôt que d'être en concurrence de se combiner. Il fallait bien faire plusieurs semis, des cultures associées légumineuses-céréales mais aussi des troupeaux suffisamment importants pour fumer convenablement ces champs et donc, avec des villages entourés de forêt mais en absence de moyens de traction, recourir à un émondage systématique dans un rayon de 12km pour assurer la survie de ces troupeaux en hiver (Saqalli 2014. *Vegetation History & Archaeobotany* 23, 1: 37-50). En raisonnant *reductio ad absurdum*, si toutes ces pratiques combinées ne permettaient pas de maintenir le système agricole stable, j'aurais montré que l'hypothèse des champs permanents aurait été une erreur.

C'est cette itération entre terrains agro-écologiques et situations socio-anthropologiques variés, par l'expérience accumulée, qui permet de délimiter l'éventail des possibles et de formaliser les systèmes compatibles.

5.1.2 Chercher la réfutabilité et la généralité

Comme dit précédemment, décrire un SSER, donc le territoire et la population qui y vit et en vit doit passer par la définition des variables par lesquelles le décrire. Cette série posée et établie par divers moyens qui les légitiment (dont le ZADA), décrire chacune de ces variables qualitativement permet de faire le tour de ce qui affecte ce territoire mais seulement de manière qualitative et différentielle (on fait apparaître les différences relatives entre zones selon ces variables : « ici, c'est plus cultivé ou pollué que là, parce que la majorité des interviewés l'ont dit »).

Ce qui signifie que selon les affinités électives de chacun, l'on n'a aucun garde-fou formel pour ne pas voir midi à sa porte : qu'est-ce qui empêcherait un spécialiste des métaux lourds de ne voir que cette contamination sur un territoire ? Quel serait l'élément qui pourrait bien perturber une vision malthusienne du pastoralisme en Afrique de l'ouest qualifiant de « sur- » toute dynamique humaine (surpâturage, surexploitation, etc.) quand financeurs, acteurs publics et opinions s'accordent sur cette représentation ? Quel élément permettrait d'inclure la majorité, celle des hybrides, mélanges de population issus des colons, des kichwas des piémonts et des amérindiens amazoniens dans le regard ethnologique sur l'Amazonie équatorienne ? Plus globalement,

comment garder l'aspect exhaustif, complet et dynamique de la démarche socio-anthropologique tout en gardant également l'aspect formel, perturbateur et contre-intuitif de la démarche quantitative ? En effet, celle-ci est la seule permettant au novice, l'extérieur, même en ne connaissant pas le terrain, de questionner éventuellement une appréciation de dynamiques locales : les mêmes données sont valables pour tous et en formalisant les critères de comparaison, on crée une manière de proposer une réfutation. La seule autre démarche de contestation est interne, propre au chercheur s'autoévaluant, suivant en cela « la rigueur du qualitatif » de Olivier de Sardan (2008), démarche de très grande honnêteté qui a pour défaut de restreindre à une seule personne le droit de contradiction pourtant essentiel. Dès lors, un critère essentiel pour construire une méthode intégrant les qualités des deux démarches, qualitative et quantitative, est alors de construire des combinaisons d'éléments formels, quantifiés ou exprimés sous forme de seuil (donc révocables et contestables par autrui) intégrant des éléments quantitatifs d'un côté et des éléments qualitatifs formalisés de l'autre. En gros, il s'agit d'indicateurs socio-environnementaux formalisés. Une approche ainsi réfutable et exhaustive basée sur des indicateurs socio-environnementaux implique de poser formellement ses différents éléments : les questions, le modèle, les indicateurs, les seuils, les scénarios. Chaque démarche de recherche doit pouvoir construire ses indicateurs de comparaison de dynamiques.

La réflexion autour du programme indicateurs environnementaux de SICMED, qui est également porté par le CNRS Liban avec les « Key-Environmental Variables », participe de cette démarche : supposons, pour l'exemple tunisien de la plaine de Mornag sur laquelle j'ai pu faire une campagne ZADA, l'encadrement d'une doctorante et quelques missions : Un premier indicateur simple, voire évident et quelque peu simpliste, sera de combiner :

- La liste qualitative des aléas recensés par la population durant le ZADA (Saqalli et al. 2020. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 5, 30) et des facteurs affectant l'exposition (fréquence des vents forts, inondation, épandage, remontée de la nappe, intrusion d'eau salée, etc.), ce qui est une première et grossière quantification ;
- Chacun de ces facteurs est ainsi transformé en niveaux d'exposition et transposé spatialement : c'est ainsi un deuxième niveau de quantification de la liste qualitative précédente ;
- Chacun de ces aléas pourrait être associé à une dangerosité (en termes de santé mais éventuellement tout simplement en coûts financiers pour l'état ou les collectivités locales) : c'est un troisième niveau d'estimation quantifiée ;
- En combinant ces éléments sur un Système d'information géographique, on crée une représentation spatialisée des priorités de risques. Combinée à une carte de densité démographique on peut voir l'impact de cet aléa en termes de risque estimé, qui inclut l'exposition (Becerra, Saqalli et al. 2013. *Regional Environmental Change*, 16, 5, 1253-1265).

En pratique, le seul ajout à une démarche somme toute classique est l'intégration au départ des éléments qualitatifs. La première estimation que l'on obtiendrait serait probablement formellement fautive mais donnera cependant un ordre de grandeur et une hiérarchie des priorités probablement utile pour justifier d'investigations ultérieures. Ainsi, elle pourra également être contestée par d'autres et discutée.

Cette démarche formalise ainsi le qualitatif et le valide comme mode de hiérarchie des priorités de recherche et d'action. Elle est réfutable parce que formalisée, a l'avantage de s'appliquer quelque peu partout, sur tout territoire : la phase initiale de recensement peut se faire par un ZADA, toute autre démarche socio-anthropologique de qualification (par exemple ECRIS formulée par Biershenk & Olivier de Sardan (1994) et reprise par ce dernier (2003)). Dans le cas de SSERs passés, c'est dans une démarche d'enquête auprès des chercheurs sur le passé ou sur des facteurs atemporels (pédologie, phénologie, agronomie, etc.) via la démarche ARDI-(QS), que ce recensement pourrait s'opérer. L'élaboration d'un modèle conceptuel qui serait le résultat de ces démarches n'est pas seulement un préalable à la construction d'un modèle informatique, il constitue un résultat en soi car il signifie qu'un agrément sur la question de recherche a été atteint après explicitation et pas sur base d'implicites tacites construisant un *modus vivendi* (Ducourneau et al. 2015).

En pratique, ce choix éthique mais aussi opérationnel d'équilibre entre disciplines ayant pour objectif de répondre à une question opérante a été à l'origine de mon souci d'éprouver cette démarche élaborée progressivement "du terrain au modèle conceptuel", partie de mon doctorat, et explique l'orientation multi-sites et aussi « dispersée » que possible de ma recherche, dans le temps et dans l'espace. Sahel et Afrique de l'Ouest

(PAD Niger ; OHM FERLOZAD ; RISE INSA), Europe néolithique (OBRESOC & MISTRALS PALEOMEX) ; Amazonie Equatorienne et Guyanaise (UT2J PASHAMAMA, UT1 MADA, OHM FEZOADA) ; Asie du Sud-Est (PEPS MIASMES, ERC MOVINDELTA, ERC GEMMES pour l'année 2020), Méditerranée du Sud (GDRI O-LIFE ; MISTRALS SICMED Indicateurs) sont autant d'occasions de réflexion, d'amélioration et de mise à l'épreuve de la démarche ici proposée. Il s'agit de maintenir cette diversité, suivant en cela le besoin d'un regard opérationnel d'Ostrom & Janssen dans Janssen et al. (2007) ; Janssen & Ostrom (2006) ou Ostrom (2009), à travers des travaux engagés dans différents projets de recherches et différents SSERs.

5.1.3 Equilibrer simplicité et complexité

- Plus la simulation se déroule sur une durée longue, plus la société simulée évolue et donc plus le modèle, pour rester valide et générique, doit envisager de variables, plus l'abstraction doit augmenter pour imiter ces évolutions. Sur une durée encore plus longue, même l'écologie doit évoluer. Par conséquent, pour plus de validité, il est préférable de restreindre d'une manière ou d'une autre la généralité de tous les modèles, par exemple, un terrain aussi écologiquement homogène que possible et un temps de simulation court.
- plus un modèle est complexe et moins déterministe, moins nous pouvons invalider quelque chose, ce qui est la seule façon d'aller au-delà de la confiance dans nos hypothèses. Par conséquent, la réduction de la complexité des rationalités peut réduire l'ampleur des résultats mais permet leur exploration.
- L'exploration de l'histoire des cultures et des sociétés implique nécessairement la simulation d'une population importante, simplement pour traduire la diversité des situations sociales et aussi obtenir des résultats statistiquement significatifs. Cependant, plus les agents sont complexes ET nombreux, plus le modèle sera lent et plus il risque de s'effondrer. Pour des raisons pratiques, il est nécessaire de simplifier le modèle le plus possible pour pouvoir l'exploiter.

Cependant, la simplicité en soi risque de ne donner comme résultats que des tautologies :

- Ainsi, montrer dans un modèle qu'une société hydro-agricole disparaît lorsque l'eau a également disparu est compréhensible, comme dans le cas fameux des Anasazi de Axtell, Kohler & Janssens (Axtell et al. 2002 ; Janssen et al. 2003 ; Janssen, 2009 ; Kohler et al. 2012). A l'inverse, montrer qu'une telle société pourrait y survivre, ne serait-ce que pour un temps, serait intéressant car contre-intuitif. Mais cela implique une plus grande complexité du modèle, ce qui se heurte à la volonté de trouver des seuils de réfutation clairs.
- La complexité, en particulier dans les sciences sociales, permet l'apparition de phénomènes d'émergence (Müller, 1998 ; Ferber, 1999 ; Livet et al. 2014). Cet aspect "petites causes, grands effets" est souvent la principale contribution de la modélisation non centrée sur l'environnement. Par conséquent, un bon modèle confirme une situation classique ou obtient des résultats contre-intuitifs en raison de la dynamique émergente du SSER ;
- La complexité et en particulier la précision de la description des phénomènes à l'interface entre la société et la nature dans l'espace et le temps, tels que les étapes du cycle agricole et leur variabilité, montre aussi que les pratiques sont très variables et adaptables à la variabilité environnementale, mais qu'elles sont aussi liées aux conditions et aux dynamiques passées, c'est-à-dire à l'inertie temporelle. Cependant, presque toujours, les données disponibles, si elles sont exactes, ne sont pas à l'échelle de précision de l'agriculteur et de sa rationalité (Alam et al. 2010). Pousser la complexité à cette échelle pertinente est la seule façon de saisir cette variabilité et cette adaptabilité. Ainsi, une même culture simulée peut s'adapter à plusieurs environnements différents sans qu'il soit nécessaire de la "forcer" par l'introduction de règles explicites.

5.2 Les étapes de MASSE

5.2.1 L'intrigue : ARDIQ, OSPHYT-DEEP

Toute question de recherche s'élabore sur base d'une justification. Celle-ci peut être réalisée sur base d'une légitimation :

- par les pairs en recherche pure, via l'accord d'experts réunis à l'occasion, au cours d'un projet ou d'un séminaire, ou simplement par le consensus recensé issu de la bibliographie qui n'est autre qu'un agrément mis par écrit.

- ou par le public en recherche dite « participative ». Cette dernière recherche a de participatif selon une « intensité » variable, qu'on peut positionner selon l'échelle d'Arnstein (1969, Figure 42). Par le public revient à un sondage et n'implique pas qu'une chose soit vraie mais qu'elle importe aux yeux du public, mais aussi qu'elle a été notée par les gens de ce public, qui sont autant de témoins : en effet, il me paraît essentiel de compiler les dynamiques que les thématiciens auraient pu ne pas recenser et ce, auprès des seuls observateurs présents continûment sur le territoire, à savoir les acteurs locaux. Cela permet de soulever certains facteurs, variables ou dynamiques à l'attention scientifique.

Dans les deux cas, ces deux légitimités, bien utilisés dans leur gamme de pertinence, justifient la question de recherche.

La légitimité par le public, ou populisme méthodologique (Olivier de Sardan, 2006) a favorisé un courant de la recherche sur la modélisation cherchant à intégrer les jeux de pouvoir mais aussi à se pencher sur ceux-ci et sur les rationalités qui les meuvent. L'approche COMMOD (*Companion-Modelling* ou modélisation d'accompagnement : Etienne, 2010) a beaucoup de sens dès lors qu'on se penche sur les modes de gestion d'un SSER et les interactions qui les sous-tendent. L'état des lieux dont j'essaie d'élaborer la démarche doit intégrer des éléments de ce regard local, bien évidemment uniquement dans le cas de SSERs actuels.



Figure 42. L'Echelle de la participation (Arnstein, 1969)

ARDIQ :

J'ai emprunté à Etienne et al. (2011) la méthode ARDI (Acteurs, Ressources, Dynamiques et Interactions) à laquelle je souhaiterais accoler quelques éléments pour former ARDIQS⁴⁶, en y intégrant l'élaboration de la question de recherche puis les scénarios prospectifs.

Créer une communauté de langage et de recherche : Il s'agit d'une méthode de travail collectif par étapes, passant par différentes sessions de recensement et de connexion des Acteurs, des Ressources, des Dynamiques puis des Interactions, permettant ainsi d'obtenir la formalisation du modèle conceptuel (Etienne et al. 2011). Cette méthode de formalisation des composantes d'un système a, comme le dit Etienne, l'avantage d'intégrer les points de vue des différents acteurs et en premier lieu d'en faire apparaître les divergences de sens pour créer un vocabulaire et une perception commune à force d'interactions. C'est donc un processus volontairement long (une semaine au moins à temps complet) qui permet d'éviter de s'affranchir des éléments d'affect et des

⁴⁶ Qui se retrouve assez proche du complément PARDI (P= Purpose) de la méthode ARDI complément élaboré depuis (Fallot et al. 2015)

rapports de force inhérents à toute collectivité. En mettant à plat les formes de domination (de genre, d'ethnie, d'âge, de puissance institutionnelle et/ou financière), elle semble faire perdre du temps au départ mais crée une forme de communauté de pensée autour de la question de recherche, communauté qu'il s'agit d'entretenir au cours de la progression du travail de recherche. Cependant, je ne saurais mieux souligner le poids de l'animateur, une personne considérée comme suffisamment légitime au sein de la communauté et suffisamment pour faire pendant aux coordinateurs dans ce travail, avec, comme meilleur exemple le projet RTRA MAELIA. J'adhère cependant à cette démarche car elle constitue une des rares démarches de travail reconnaissant le poids des affects, de l'arène sociale qu'est un projet de recherche et le caractère « sociologiquement normal » des conflits en son sein. A titre d'illustrations, une série d'interviews en ligne des partenaires français du projet MONOIL, à l'origine du modèle PASHAMAMA puis une semaine de réflexion collective en mai 2014 avec les partenaires équatoriens a permis d'élaborer au départ des listes désordonnées de variables importantes qu'un travail de réorganisation a permis de formaliser en suivant la nomenclature UML (*Unified Modeling Language*) (Figure 43).

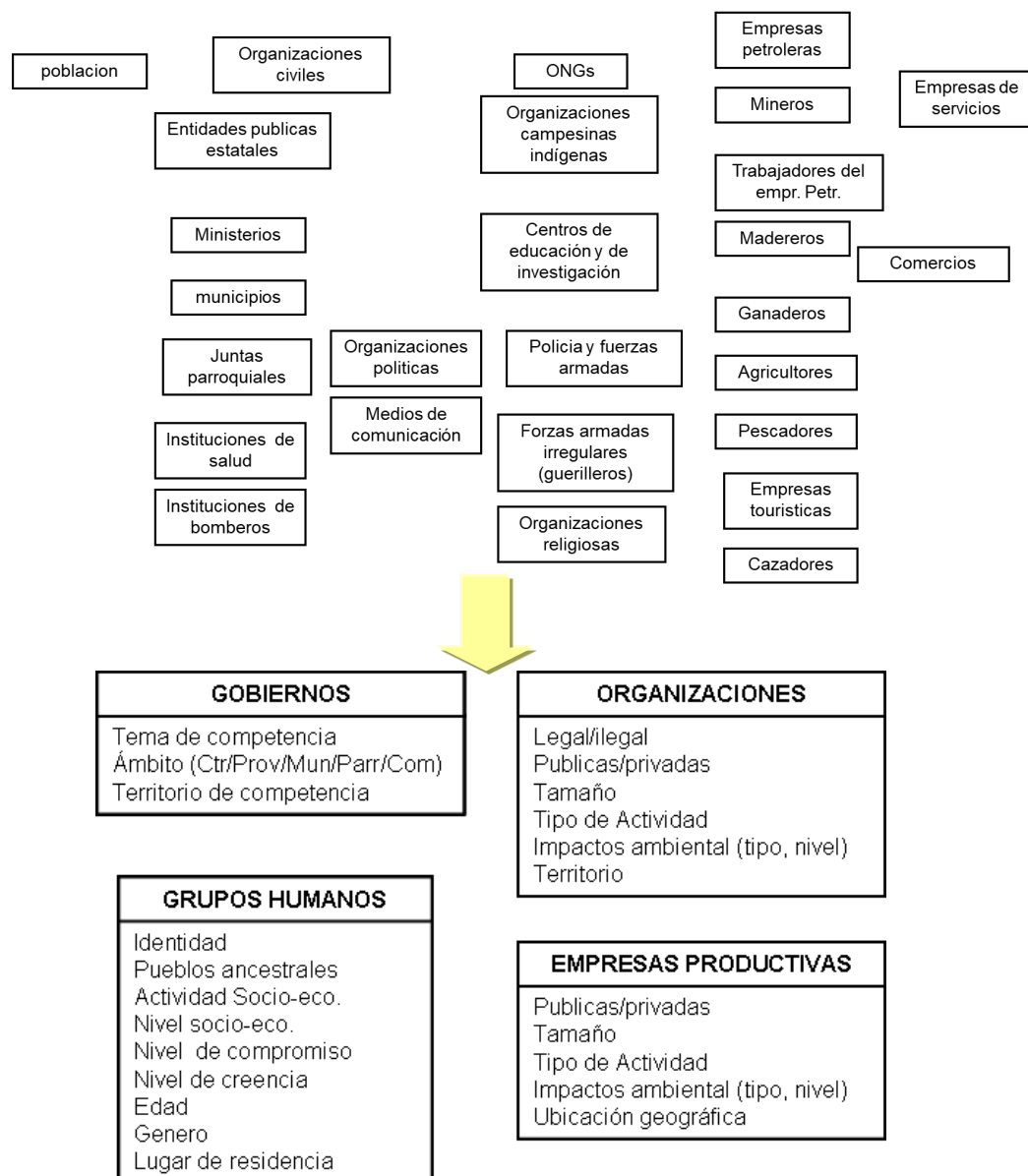


Figure 43. Progression du processus de formalisation, d'abstraction et d'organisation du système socio-écologique de l'orienté Amazonien par les partenaires du projet MONOIL, pour identifier les variables caractérisant les acteurs à intégrer dans la modélisation

Construire un code de règles : A partir de cette première étape en début de projet de modélisation, il s'agit d'enclencher un processus de construction du modèle conceptuel par réunions régulières, petits groupes dédiés à une composante et regroupements pour faire confirmer mutuellement les orientations de la réflexion. Ce

processus a pour objectif d'élaborer conjointement les règles qui relient les variables identifiées au travers de la littérature disponible. Pour contrer la tendance à la tactique de sécurisation de type « Montre ton modèle, on te dira si c'est bien » comme décrit plus haut, il me paraît utile de rappeler que parcourir la littérature sur tel thème pendant quelques semaines ne donne à l'architecte du modèle ni les compétences, ni les connaissances ni l'expérience acquises par le spécialiste de telle ou telle discipline, ce qui est bien heureux ! Un modélisateur ne saurait trier dans la littérature d'une thématique particulière. C'est le regard de l'expert qui va « filtrer », quantifier les règles à l'échelle des entités élémentaires, parcelles, familles et pas de temps, pour être implémentées dans le modèle. Son implication est cruciale. Ces règles doivent décrire et paramétrer le comportement des entités : ainsi, la Figure 44 montre les actions à réaliser par un agent humain et la chaîne de conditionnalités pour le cycle agricole.

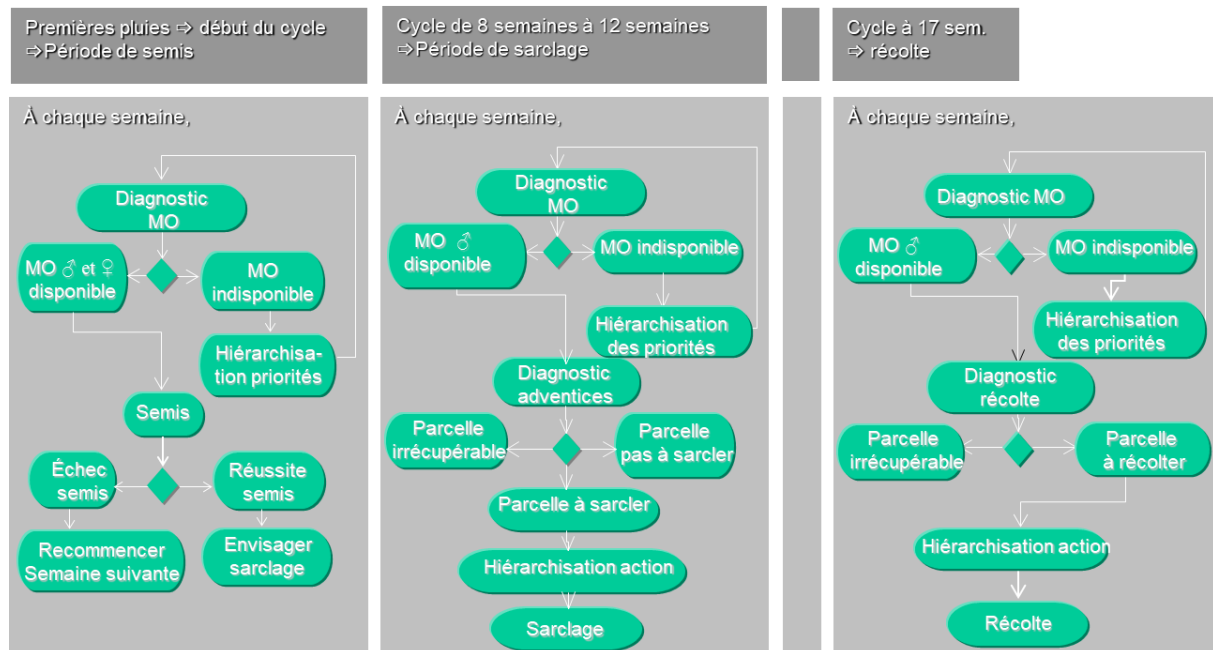


Figure 44. Formalisation par diagrammes d'activités UML des trois étapes successives du cycle agricole requérant de la main d'œuvre, chacune correspondant à une séquence d'évaluation et d'action.

En pratique, ce processus de construction est doublement itératif par allers-retours entre d'une part littérature & terrain et formalisation de règles donc entre informations et modèle conceptuel, et d'autre part entre modèle informatique et modèle conceptuel, le premier testant la solidité et l'exhaustivité du deuxième. Seule une personne effectivement dans la pratique de ces fonctionnements peut retranscrire ces dynamiques. Ainsi, c'est à force d'observer les paysans et villageois au Niger et lire l'importante littérature sur la variabilité du système agricole que toute conditionnalité des étapes agricoles par rapport à des dates précises m'est apparue comme un forçage artificiel. J'ai ainsi choisi d'établir un calendrier établi avec des processus aléatoires pour chaque parcelle. De même, la Master 2 L. Morin était arrivée à la même simplification pour les cultures en Amazonie Equatorienne : en termes agricole, cet espace n'a (presque) pas de saison ! On pourra ainsi user de la métaphore des pouvoirs législatifs des thématiciens, qui créent les règles et les lois, et des pouvoirs judiciaires des modélisateurs qui mettent en application et confrontent au réel ces lois et règles modélisées.

OSPHYT-DEEP

Dans cette section, je vise à formaliser l'argumentation en fonction d'une série de questions. Ces questions sont destinées à clarifier l'objectif du modèle et, par conséquent, sa tâche. En effet, j'ai observé à plusieurs reprises que, de manière surprenante, lorsque la construction d'un modèle est réussie et que les partenaires scientifiques voient les premiers résultats de simulation induits lors de la mise en œuvre, ils obtiennent une extension de leur objectif au-delà de leurs buts initiaux. Ils peuvent même arriver à une distorsion de ces objectifs. Je propose l'acronyme suivant pour cette formalisation : **OSPHYT** :

- **Objet** : quel est le territoire et/ou la population à mettre en œuvre et dans quel ordre ? Cela permettra, par exemple, de définir l'échelle du modèle ou le niveau de précision spatiale et temporelle auquel le modèle doit être construit. Par exemple, un modèle de la culture rubanée (ou LBK), doit préciser si le but du modèle est de reconstituer le fonctionnement du village de LBK ou la dynamique de l'expansion de LBK, qui sont deux tâches différentes et nécessitent donc deux échelles différentes. À des fins d'illustration, l'exemple LBK sera réutilisé ici.
- **Sujet** : Le sujet du modèle définit la partie de l'objet à explorer, déformée et soumise à des tests, tandis que le reste doit être considéré comme *ceteris paribus*. Par exemple, il convient de clarifier la distinction entre territoire et société, car le premier induit une procédure modèle basée principalement sur des données paléoenvironnementales comme intrants dans les explorations sur une société avec des tests basés sur des données archéologiques, tandis que le second implique de s'appuyer d'abord sur des données archéologiques comme intrants avec des tests basés sur des données paléoenvironnementales. Dans ce cas, nous pouvons choisir de travailler sur la composante sociale du SSER, en mettant l'accent sur son adaptabilité spatiale et sa variabilité temporelle.
- **Problématique** : Le problème principal du modèle devrait être clarifié par une question qui devrait se terminer par un point d'interrogation et à laquelle on peut répondre par un oui ou un non, avec bien sûr des conditionnalités et des restrictions. Dans la présente étude, par exemple, on peut se poser la question suivante : est-ce que le SSER ainsi conçu, y compris son adaptabilité basée sur une rationalité séquentielle suivant un système de préférence décroissante, s'adapte et correspond à la distribution écologique, spatiale et temporelle de LBK ?
- **Hypothèse** : Cette étape est la procédure pour obtenir un test sur notre question. Dans notre cas, je fais l'hypothèse suivante : ce SSER est d'une part adaptable à la grande diversité des conditions environnementales des différents sites archéologiques LBK, et d'autre part suffisamment stable agro-écologiquement pour lui permettre de se maintenir plusieurs siècles sur plusieurs sites différents.
- **Test** : Cette étape plus facile, une fois l'hypothèse obtenue, consiste à proposer une formulation de la méthodologie du modèle. Pour éviter la tentation très commode mais moins formelle de construire un SSER, qui n'est pas cohérent en termes de zootechnie, d'agronomie, de pêche et d'agroforesterie en ce qui concerne son adéquation avec les données archéologiques spatiales, deux méthodologies peuvent être envisagées :
 - Je peux construire un système agricole avec des préférences environnementales selon la rationalité du SSER telle qu'elle est déduite de la même hiérarchie époque/écosystème du §3.1.2 et donc des données archéologiques spatiales. Je compare ensuite les résultats de la simulation qui en résulte avec la répartition des sites archéologiques ;
 - Je peux proposer de sélectionner une partie représentative de ces données spatialement positionnées afin de déduire les préférences en matière de LBK en termes de topographie, de sols, d'hydrographie et d'organisation spatiale et de tester la construction du SSER sur la base des données archéologiques et des inférences d'autres sources suivant la hiérarchie ère/écosystème avec le reste des données spatialement positionnées.
- **DEEP : D'abord Exact Ensuite Précis** : définir les variables du modèle. Nous avons déjà soulevé le point de la surdétermination de la question par les données disponibles en particulier dans les SSERs pour lesquelles les données sont rares : par défaut, on fait des hypothèses de causalité à partir de corrélations même pas statistiquement avérées, vu la difficulté pratique d'avoir suffisamment de données. Ainsi, les explications déterministes de l'environnement à tout changement archéologique en Europe néolithique ou tout changement au Sahel sont souvent utilisées. Cette tendance ressemble à celle d'un chef cuisinier travaillant uniquement en fonction de ce qui se trouve dans le réfrigérateur : le problème n'est pas posé de manière à répondre au mieux à la question mais plutôt à répondre avec ce que l'on a. Cette façon de faire se veut, après tout, pragmatique ; cependant, elle soulève une question : comment puis-je renverser le raisonnement si je ne donne la priorité qu'aux éléments sur lesquels je dispose de données ? Une première exploration, qualitative, définissant d'abord les variables puis recherchant des résultats et des données de plus en plus précis, me paraît plus valable scientifiquement pour appréhender une question scientifique sur les SSERs. C'est au cours de la démarche ARDIQ que doit se placer le recensement des variables indépendamment des données. Cela se traduit dans une démarche à la base large, éventuellement à

étaient mus par des différenciations intrafamiliales et pas interfamiliales. Je sépare le modèle en trois sections selon une hiérarchie de complexité et de sources d'information mais aussi selon la définition de la question de recherche, de ce qui est central dans la démarche et de ce qui ne l'est pas. Ici, suivant OPSPHYT, il s'agit de différencier ce qui appartient au décor, aux variables dont les paramètres sont considérés comme connus et ne font pas l'objet de la question de recherche à l'origine du modèle, de ce qui appartient à l'objet de recherche et au sujet qui le concerne :

- La première partie correspond au décor, au cadre du modèle, sur lequel nous n'enquêtons pas et qui ne correspond pas à nos questions de recherche. En pratique, cela veut dire que les missions de terrain ne doivent pas concerner cet aspect, car je suppose sa validité. Pour la section biophysique (climatologie, pédologie & phyto-écologie), les règles et paramètres sont basés sur la littérature publiée (articles de revue ou de conférence, ouvrages et chapitres) et non publiée disponible (rapports & documents d'agences de développement ou de recherche, thèses de maîtrise et de doctorat). Les processus humains qui ne font pas appel aux logiques de la socio-anthropologie de la gestion des actifs de production appartiennent également à cette catégorie et sont mis en œuvre de manière purement réactive⁴⁷, comme par exemple la démographie, les prix des produits extérieurs, les contraintes physiologiques (alimentation, vieillissement, maternité et naissance, décès, etc.). Pour ces aspects, les agents sont des objets simples. Si ces données sont absentes, alors elles sont à "créer" à partir d'hypothèses, par inférence et/ou analogie ;
- La deuxième partie est l'objet du travail de recherche, y compris sur le terrain, et sera modélisé suivant l'ensemble constitué et structuré de règles sociales, économiques et anthropologiques issues du travail de terrain. Les règles de comportement caractérisant les logiques des agents sont basées sur la traduction des résultats d'enquête selon un processus d'interprétation similaire à celui de Gladwin (1989), cité par Huigen et al. (2006). Ces règles empiriques traitent du sujet même et concernent l'objet des travaux qui m'intéressent parce que leur élaboration traduit les rationalités des acteurs en actions de transformation du territoire et qu'ils en sont les principales forces de transformation de ce territoire, des ressources physiques mais aussi des organisations sociales qui les conditionnent en retour, en bref, l'ensemble des composantes d'un SSER. L'étape d'élaboration des règles est une sorte de mise en confiance vis-à-vis de l'étape de terrain : la reconstitution du fonctionnement dynamique du système global doit témoigner de la bonne compréhension de ce système ;
- La troisième partie consiste à considérer plusieurs hypothèses de travail construites à partir de la littérature mais "choisies" sur la base d'observations de terrain, qui servent de base et de justification aux scénarios prospectifs. Dans le modèle, un processus cognitif et plus élaboré est développé pour répondre à une proposition réelle de stratégie : par exemple au Niger, chaque scénario correspondait à différentes propositions de développement.

5.2.3 Unités de temps, de lieu et d'entité : les mailles

Mailles, échelles et questions de recherche : je définis une maille comme étant l'entité élémentaire qui constitue la granularité des différentes dimensions des modèles conceptuels, puis informatiques. Ceux-ci sont le plus souvent distribués, i.e. sont constitués d'entités se répétant avec des caractéristiques équivalentes (par exemple des pixels pour une maille spatiale, des pas de temps) mais se déclinant avec des valeurs variables (exemple : des pixels dont la variable altitude varie). Le choix de ces mailles est malaisé et complexe : lesquelles choisir lors de la définition d'un modèle conceptuel et plus encore informatique ? Trois critères essentiels semblent revenir dans les débats : la pertinence, i.e. choisir la maille (1) la plus grande possible pour avoir moins d'entités à gérer mais (2) à un niveau tel que les variations et/ou les impacts que l'on cherche à identifier, qui sont l'objet de la question de recherche, restent visibles et (3) si possible pour lesquelles on ait des données, même si, on l'a vu, cela ne doit pas être le critère fondamental. Ces mailles constituent des verrous à appréhender dans la conceptualisation des modèles, dans la formulation et la construction des indicateurs et dans le choix et la dissémination des scénarios. Ces mailles, entités atomiques, doivent s'accorder avec les échelles, i.e. les tailles

⁴⁷ Réactifs au sens d'Amblard, Rouchier et Bommel (2006) à savoir des processus réagissant à des stimuli extérieurs et des horloges internes, les plus simples à construire.

dans lesquelles sont construits les modèles : la taille du territoire, la durée que simule le modèle, etc. L'aspect pratique de ces choix, transcription effective de l'obligation de formalisation décrite plus haut, est un exercice nécessaire et contraignant donc créatif mais aussi source de clivages dans la conception d'un modèle de pensée puis informatique :

- **Mailles spatiales** : Les couches biophysiques sont souvent disponibles à l'échelle du km² au mieux en particulier pour les plus anciennes issues de LANDSAT. Cependant, la taille non pas moyenne mais maximale d'un champ, en particulier maintenu et géré sans outil motorisé, est bien en dessous et souvent inférieure à l'hectare. De plus les effets de pente, d'érosion et d'altération des sols se font à minima à l'échelle de l'hectare et très grossièrement au km². Par conséquent, il me semble nécessaire de réaliser les jointures des différentes couches utiles à une maille la plus fine possible et la plus proche de la parcelle moyenne locale, ce qui est facilement identifiable par les images disponibles. On ne peut considérer un modèle avec des mailles supérieures au km² comme acceptable et il serait préférable de privilégier au moins l'hectare car c'est l'échelle d'action maximale d'un paysan en termes de parcelle gérable au niveau de la main d'œuvre et de la fertilité des sols ;
- **Mailles temporelles** : le pas de temps du modèle doit rendre compte des différences discriminantes dans le déroulé du temps, comme les différences climatiques entre saisons. Nombre de modèles veulent rendre compte de tendances sur le long terme et envisagent ainsi un pas de temps annuel mais comme dit précédemment, les agriculteurs en société rurale non motorisée subissent des accidents. Les vies ne sont pas parfaitement planifiables et éliminer l'aléatoire, les chocs sociaux ou agricoles, les coïncidences malheureuses (mauvais hiver puis mauvais été) est une manière de passer outre cette discrimination : si ces coïncidences ont une occurrence rare mais bien réelle, alors elles apparaîtront systématiquement sur le temps long et doivent être intégrées dans l'appréhension du réel lors d'une modélisation comme éléments de risques à l'échelle d'une famille, de changements de trajectoire à l'échelle d'une population. C'est pourquoi souscrire à un pas de temps annuel est risqué car il surévalue les déterminismes environnementaux à long terme en supprimant les accidents à court terme faisant de la saison le pas de temps minimum, comme cela est considéré pour PALEOMEX ou pour OBRESOC. Inversement, un pas de temps au mois (modèle PASHAMAMA en Equateur) ou une semaine (SIMSAHEL au Niger) peut être utile pour rendre compte de certaines contraintes apparaissant sur le terrain comme essentielles : ainsi le pas de temps d'une semaine était utile sur le Sahel nigérien pour rendre compte de la principale contrainte créant des différences entre les familles, la main d'œuvre disponible : l'étape agricole la plus courte sur un champ de 1ha est le semis, qui prend une semaine. En Equateur, le cycle le plus court est le maraîchage, qui prend un mois, et les contrats pétroliers sont de 1 à 3 mois selon les statuts.
- **Mailles sociales** : l'individu ou la famille et la population d'un territoire. Plusieurs possibilités peuvent être envisagées pour simuler des entités humaines, qui sont toutes liées à la question étudiée et, par conséquent, l'échelle et le fonctionnement envisagé :
 - Les individus : Cette composante permet de simuler les tensions et les changements intrafamiliaux et donc toutes les variations de transmission d'héritage, de discrimination de sexe ou d'âge et d'organisation familiale telles que décrites ci-dessus, d'où la possibilité de considérer des "cultures" dont l'adaptation est plus ou moins rapide. Cependant, cela nécessite la formalisation de rationalités intrafamiliales sur lesquelles peu d'informations sont disponibles. Par ailleurs, cela impose un nombre énorme d'entités, chacune correspondant à un seul individu, ce qui est difficile à gérer au-delà du niveau d'un seul village. Ce fut le choix dans SIMSHAEL pour le Sahel nigérien du fait du poids de ces dynamiques intrafamiliales dans ces trajectoires socio-environnementales ;
 - Les familles : Cette entité intermédiaire ne permet pas d'expliquer les adaptations différentielles à l'environnement par l'organisation familiale. Cependant, elle peut envisager des différenciations interfamiliales et par là une stratification lignagère et sociale. On peut considérer que cela permet une "économie" d'entités avec un rapport de 1:5 à 9 par rapport à l'entité "individuelle". En pratique, le choix de l'entité entre familles et individus dépend du degré d'autonomie des membres de la famille. Le cadre romain du pater familias est encore considéré comme le modèle par défaut dans le monde méditerranéen et européen. Par conséquent, la plupart des modélisations des sociétés rurales sont construites avec des familles comme entités élémentaires, ce qui suppose obligatoirement une mise en commun de la main d'œuvre, des gains et des stratégies et choix de gestion. En pratique, cela revient à considérer un chef de famille. En droit et en pratique, ce modèle ne peut fonctionner pour les sociétés sahéliennes que j'ai

étudiées, au Niger : les choix des activités et leurs gains ne sont pas restreints et contrôlés par le seul père qui ne peut rien imposer complètement ; il y a négociation entre membres de la famille, correspondant ainsi plus au modèle non-coopératif obligatoire décrit par Mathieu (2002), Donni (2004) et Chiappori & Donni (2006). C'est le choix du modèle PASHAMAMA pour l'Amazonie Equatorienne car c'est la trajectoire du territoire et de la population globale que l'on observe, le terrain ne montrant pas de bouleversements de structure familiale. C'est aussi le choix de la proposition de modèle local OBRESOC, puisque j'avais fait l'hypothèse qu'à partir du départ de la culture LBK, il n'y avait pas de changements structurels du fonctionnement de la famille LBK.

- Les villages : On peut considérer cette entité fixe comme créant d'autres villages. Il est possible de créer les attributs "nombre de familles" ou "nombre d'individus" mais pas les "enregistrements" de la dynamique familiale, ce qui signifie qu'il est impossible de discerner les familles et encore moins les individus et donc aucune différenciation entre ces entités dans leur utilisation des ressources du territoire : ce serait le village dans son ensemble qui évoluera. Cependant, cette échelle est pertinente à l'échelle mondiale ou pour des entités telles que les continents. On peut considérer que cela permet une "économie" des entités d'un rapport de 1:5 à 20 par rapport à l'entité "famille". C'est aussi le choix de la proposition de modèle OBRESOC global, qui serait déduit du modèle local.

5.2.4 La MASSTABA de briques

La gestion des briques

Modules autonomes : Courdier et al. (1998) décrivent la construction d'un modèle de manière classique comme une spirale itérative où les modélisateurs font des allers-retours sur les différents modules du modèle par des ajustements progressifs, entre réalité et modélisation d'une part et élaboration du fonctionnement des entités et calibration du fonctionnement de l'ensemble du modèle d'autre part. J'adhère à ce point de vue mais cependant, je considère que l'ampleur de la variabilité du modèle à observer peut être réduite. En effet, il y a intérêt pratique dans l'évaluation d'un modèle de réduire l'ampleur de son espace simplement du fait du gain de temps associé. Cela passe par une construction en modules bien individualisés et cloisonnés où chacun de ces modules représente une thématique bien définie et où les connexions avec d'autres modules seront restreintes et très définies, permettant de pouvoir évaluer le fonctionnement d'un module en tant que tel.

Ce très classique processus modulaire gagnerait à être hiérarchisé selon le niveau de dépendances des variables. L'idée est de commencer un modèle par les modules considérés comme indépendants des autres à savoir par exemple le climat, qui peut être considéré comme indépendant des actions locales, des caractéristiques biophysiques du territoire (altitude, carte des sols par exemple) dont l'évolution est en général beaucoup plus lente que les dynamiques humaines. Cette évolution peut donc être considérée comme indépendante (inversement, on peut créer deux variables, l'une mouvante, la fertilité des sols, et l'autre, fixe, qui caractérise le type de sols et par là sa réactivité potentielle). Ces dépendances sont imbriquées ou plus précisément structurées à la manière d'une ziggourat dans les civilisations mésopotamiennes ou d'une pyramide à degrés, appelée mastaba à degrés pour l'Egypte ancienne (Figure 47), ce que je nomme ici par dérision MASSTABA en lien avec l'acronyme de notre démarche (Modules Multi-Agent Socio-Spatialisés éTagés et Agencés en Briques Articulées).

- Ainsi trouvera-t-on à la base de cette MASSTABA de dépendances et donc comme premières briques de base, les variables abiotiques indépendantes, tels que le climat, la topographie, les sols, les rivières et rivages ainsi que la gamme des espèces végétales et animales présentes.
- Dès lors est construit le module immédiatement dépendant, i.e. la distribution et la variabilité spatiale et temporelle des biocénoses et biotopes.
- L'étage suivant est à la fois déduit de l'étage précédent, le capital technique, animal et végétal des productions agricoles et ses potentialités et dépendances en fonction de l'environnement. Combinées avec des structures sociales et économiques, on élabore les pratiques d'utilisation des ressources naturelles (agriculture, élevage, chasse, cueillette et pêche).

- A l'étage suivant encore, les dynamiques qui affectent les sociétés, affectées par les activités de production mais aussi par des dynamiques propres, sur le temps rond⁴⁸ et sur le temps long⁴⁹.

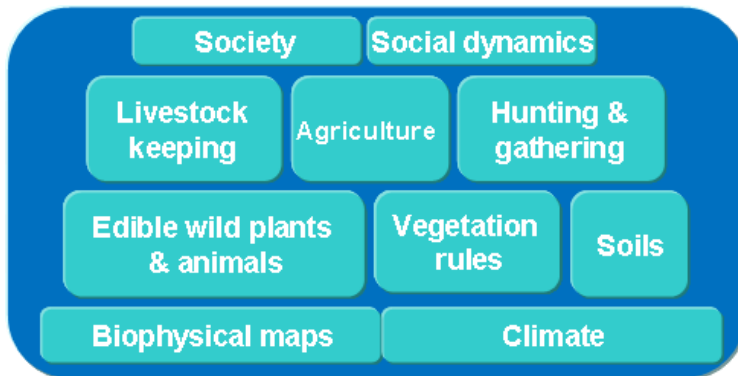


Figure 47. La MASSTABA de dépendances

Marge d'erreur partielle, variabilité partielle : Que faire avec l'incertitude ? Chaque donnée obtenue par des mesures, des enquêtes ou autres moyens de collecte de données et d'informations comporte une marge d'erreur. Les données sociales d'enquête sont rares, puisqu'elles nécessitent des méthodes prenant du temps et des moyens logistiques et financiers, comme les données paléoenvironnementales et archéologiques. Par exemple, les données palynologiques fournissant des reconstitutions de la température et de la pluviosité à partir des sources de la base de données européenne sur le pollen (www.europeanpollendatabase.net/index.php) ont une marge d'erreur normale sur ces deux variables. Une analyse statistique sur la variabilité de leurs valeurs est donc difficile, à l'exception de certaines données répétables (poteaux de maison, poterie quotidienne sur des terrains archéologiques ; questionnaires, ZADAS sur des terrains actuels). Mais il y a ici plusieurs incertitudes :

La variabilité inhérente de la variable elle-même est ici recherchée : la température moyenne d'un mois de janvier ne sera pas la même d'une année à l'autre et on aimerait rendre compte de cette variabilité. Mais la trace paléo-environnementale peut créer de l'incertitude (telle gamme de valeur de ¹⁸O/¹⁶O ou tout autre isotope, de charbon ou de corpus de pollens correspond à telle gamme de température et pas une température précise). Enfin la mesure de cette trace peut également amener de l'incertitude. Comment déduire de la variabilité de l'indicateur la variabilité de la variable elle-même ? Différents outils statistiques existent mais sont propres à chaque discipline, voire ne sont pas construits en tant que tel. Plus encore, la modélisation suggère la création de bruit : l'adaptation de ces données au niveau du mois et pour chaque km² d'un territoire (puis ensuite transmis aux hectares qui le composent), implique la création de températures et de précipitations mensuelles randomisées dans la gamme de valeurs de la donnée recueillie, ce qui nécessite un écart-type pour ce faire.

J'utilise alors par défaut la marge d'erreur de l'indicateur : elle est d'une part la seule donnée disponible sans analyse statistique complexe de la mesure elle-même mais d'autre part, elle inclut forcément les fluctuations de la variable et constitue ainsi une estimation des bornes maximales de cette variance. Cette approximation amplifie certes *de facto* la gamme des extrêmes de la variable considérée, comme par exemple le climat reconstitué de l'holocène au niveau local, même si la moyenne reste bien la donnée d'origine. Cette procédure peut être vue comme grossière mais doit surtout être gardée en mémoire lorsque le modèle construit est bien utilisé comme une paillasse d'expériences, i.e. dans le cadre de la démarche expérimentale et l'invalidation donc un raisonnement par l'absurde. Par exemple, si dans tel climat ainsi reconstitué, forcément un peu plus extrême que la réalité historique, les sociétés survivent quand même, alors on pourra remettre en question sur cette base la connexion souvent faite le déterminisme environnemental local qui est souvent envisagé, si elles ont effectivement subi une crise climatique dans la réalité historique. On ne pourra cependant rien affirmer si elles

⁴⁸ Cycles annuels et générationnels

⁴⁹ Jeux politiques, dynamiques de stratification sociale, d'auto-organisation et d'occupation du territoire (y compris les processus de colonisation)

ne survivent pas statistiquement dans la modélisation. Ce point peut être considéré comme utile pour des éléments des composantes sociales du SSER, tels que la taille de la famille (en utilisant la taille de la maison comme variable proxy), la taille du bétail (en utilisant la consommation de viande comme variable de substitution) ou l'inégalité entre les sexes (en utilisant la richesse des tombes comme un proxy).

Rang et poids : tout ne rentre pas dans un modèle qui est répétons-le, une simplification. Pour sélectionner les variables à intégrer, il faut créer comme toujours un indicateur et un seuil à cet indicateur. De manière formelle, cet indicateur doit être relié au poids que prend la variable dans la dynamique du système. Comme on ne sait théoriquement pas encore comment fonctionne ce système puisqu'on cherche à le modéliser, on fait une hypothèse a priori sur cette importance. Je propose que nous estimions l'importance à donner à une variable et donc la moindre simplification que l'on va lui donner comme étant l'inverse de la distance à la dynamique principale à modéliser, qui, elle, est le reflet de la question principale à l'origine du modèle. Ainsi, plus une variable est censée dans le modèle conceptuel jouer un rôle majeur, plus elle doit être décrite. Surtout, la description ne doit pas être plus raffinée simplement parce que nous avons beaucoup de données sur elle. Cette importance doit se composer de deux choses :

- La distance absolue, ici ce qu'on a appelé **le rang** à la dynamique principale : par exemple, si nous considérons que pour tel modèle, la croissance des plantes est une variable que nous poserons comme fondamentale et nécessaire pour le modèle, donc de rang 1, alors le bilan hydrique, le pH ou le taux de matière organique sont des variables de rang 2 et la hauteur de la nappe phréatique affectant le bilan hydrique, une variable de rang 3 par rapport à ce taux de croissance des plantes ;
- La distance relative, à savoir **le poids** de cette variable par rapport aux autres variables de même rang : dans l'exemple précédent, si on doit hiérarchiser les variables de rang 2, certes le poids du pH restreint les types de plante « autorisées » à pousser, éliminant un type fonctionnel de plantes (ou PFT). Au-delà de cette première contrainte, il aura un poids beaucoup plus faible qu'une variable de même rang comme le bilan hydrique.

Équilibrer le modèle consiste ainsi à ne pas donner une complexité trop importante à telle dynamique parce qu'elle est mieux connue ou plus attrayante ou correspondant aux compétences disponibles mais en faisant en sorte que la complexité de la description d'une variable soit fonction de son poids par rapport aux autres variables de même rang, mais aussi que l'on s'arrête de préférence au même rang pour les différentes variables d'une même entité.

Les briques biophysiques : empilement et connexions

- *Nombre de données sont disponibles t c'est leur arrangement qui compte* : La mise en place du « décor » est facilitée par l'existence de couches d'informations spatialisées libres d'accès et disponibles⁵⁰, comme l'altitude, le sol, desquels on peut déduire le réseau hydrique, voire les nappes phréatiques, etc. De même, les reconstitutions climatiques pour ce qui concerne les précipitations et les températures ne sont plus de notre seul ressort : l'European Pollen Database ou le projet WorldClim fournissent des données tout à fait acceptables, exhaustives et assez précises, de l'ordre du km² pour plusieurs périodes de l'Holocène. Pour l'actuel, le même projet WorldClim, l'Organisation Météorologique Internationale ou des laboratoires comme le LSCE (Laboratoire de Simulation du Climat et de l'Environnement) disposent de bases de données exemplaires. Paradoxalement, les mécanismes mimant le fonctionnement des écosystèmes à partir de ces couches « consomment » une grande quantité de temps de travail : elles correspondent aux disciplines où les biophysiciens peuvent s'impliquer et la simplification des mécanismes environnementaux se heurte bien naturellement au souci des partenaires de voir retranscrit des mécanismes complexe mais pas forcément au cœur de la question de recherche envisagée pour le modèle (Figure 48). Comme les mastabas historiques, le risque est de rester trop souvent au premier degré des écosystèmes, sans pouvoir passer aux degrés des

⁵⁰ USGS, ESA / Union Européenne, CNES, BRGM, Geoportail, etc.

sociétés et ainsi rester dans les premières couches écosystémiques pour lesquels on dispose de données et oublier de facto le niveau où l'inconnu est bien plus grand.

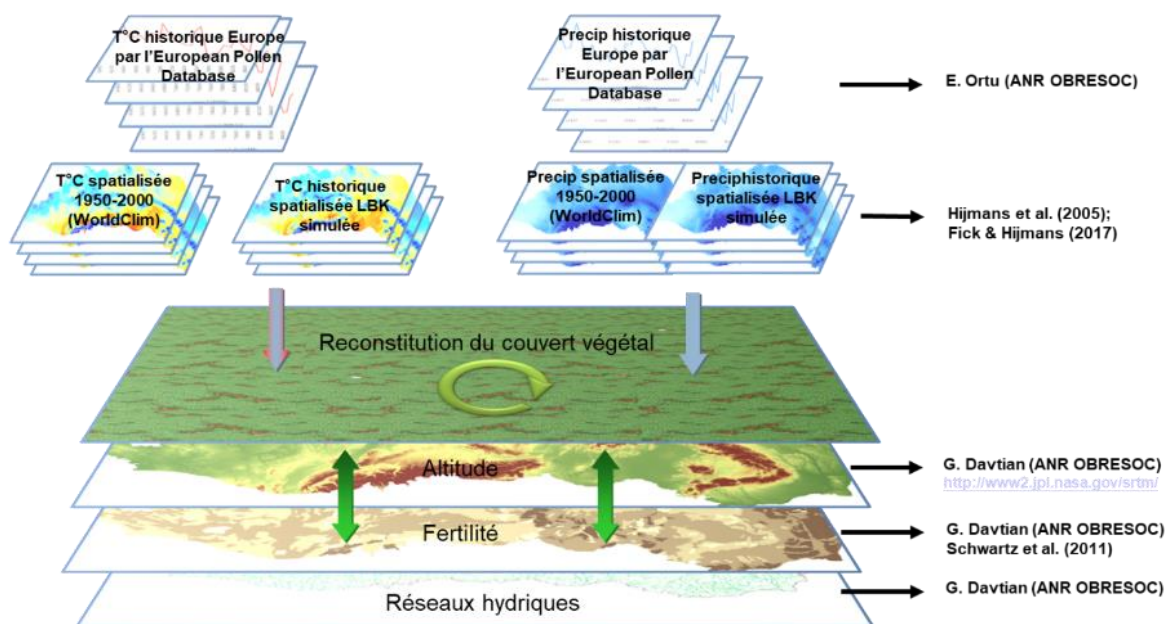


Figure 48. Reconstitution de l'environnement biophysique (climat + couverture végétale) pour OBRESOC

- *Les plateformes informatiques dédiées sont de plus en plus pratiques* : Par l'utilisation de plateformes dédiées à la reconstitution de territoires. En particulier, la plateforme GAMA (GIS Agent-based Modeling Architecture, ou Architecture SIG de Modélisation à base d'Agents en français : <https://gama-platform.github.io/>) mise au point par l'équipe de recherche franco-vietnamienne MSI (MIAT, IRIT, UMMISCO) au premier chef desquels Patrick Taillandier et Benoît Gaudou, est particulièrement bien adaptée au sens où elle est conçue pour intégrer aisément des couches géographiques et des mécanismes réactifs massifs des automates cellulaires, i.e. des pixels du territoire. J'avais auparavant travaillé et m'étais formé sur d'autres plateformes, CORMAS sur laquelle j'ai réalisé le modèle de ma thèse, SIMSAHEL, ou la première version incomplète d'OBRESOC, ou NETLOGO (<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>) (Abar et al. 2017 ; Taillandier et al. 2018 ; Pal et al. 2020). Ainsi, des processus affectant des variables comme l'eau disponible, les sols et même l'altitude sont facilement reproduits, comme les modèles SIMSAHEL, PASHAMAMA, OBRESOC ou PALEOMEX en attestent. Par conséquent, cette facilité de gestion de l'information géographique est mobilisée pour transférer plusieurs processus biophysiques aux pixels ;
- *Les processus biophysiques sont anhistoriques* : Il existe certes des processus biophysiques qui ne sont pas encore intégrés géographiquement et pour lesquels la reconstitution simplifiée sur ce genre de modèle prend un temps considérable. Un premier exemple est la reconstitution des flux hydriques à partir des données climatiques de WorldClim (www.worldclim.org) pour rendre compte des variations de débit des rivières sur l'Orient Amazonien dans le modèle PASHAMAMA et ainsi faire apparaître des inondations (ou des remontées de nappe) qui, si elles coïncident avec des contaminations pétrolières, induisent des contaminations des champs cultivés. Cette étape prit plusieurs mois de travail. Dès lors, la méthodologie est maintenant formalisée et est ré-envisagée pour d'autres actions comme PALEOMEX. De même, la reconstitution de la dynamique de végétation pour le programme PALEOMEX n'est qu'une partie de la constitution du décor pour la mise en place de sociétés néolithiques. Cependant, ma proposition de reconstitution de la végétation par les Plant Functional Types (PFTs : Barboni et al. 2004 ; Diaz et al. 2009 ; Mauri et al. 2015 ; Cahierre, 2019), qui permet de rendre automatique et progressif l'adéquation entre biotope et végétation mais aussi des évolutions de la couverture végétale selon les évolutions du climat, a impliqué deux stages de 5 mois chacun pour simplement classifier les espèces ligneuses en PFTs puis les envisager sur un territoire languedocien. Cette procédure pourra également être réutilisée pour d'autres modèles. Ainsi, chaque modèle permet de construire un module spécifiquement dédié à un processus biophysique, les flux hydriques ou les dynamiques de végétation, indépendamment de la question de recherche, et générique donc réutilisable : l'expérience de modélisation devient ainsi un processus

accumulatif de constitution d'une bibliothèque de modules empiriquement constitués et réutilisables avec certes un travail d'adaptation à d'autres contextes.

Les briques sociales pour des sociétés passées : qu'est-ce qu'une bonne donnée du passé ?

Les critères pour évaluer ce qu'est une bonne donnée en général ont été décrits précédemment via l'acronyme *Egi per Precium*. Je suppose l'isotropie dans le temps de la rationalité (intégrée à son contexte et limitée) et de l'écologie, le comportement actuel d'un système socio-écologique est lié à son passé et à son contexte. Cela veut seulement dire qu'à partir des circonstances, sociales et environnementales identiques, et la même mémoire, la gamme d'action d'un agriculteur ou d'un autre acteur est limitée et ne dépend que de ses conditions propres. La paramétrisation est suffisamment souple et fluide pour permettre une très grande gamme d'actions. Les données archéologiques, résidus d'actions sociales sont, elles, situées temporellement et contextualisées. Ainsi doit-on considérer les techniques d'accès aux ressources (agricoles, d'élevage, etc.) mais aussi les règles d'accès à ces mêmes ressources (organisation intrafamiliale, interfamiliale, héritages...). En effet, la composante sociale des SSERs passés ne peut être envisagée que par analogie et emprunt de règles provenant de sources extérieures mais similaires. Il faut alors construire une hiérarchie de la validité et de la légitimité de ces sources d'information et de données dont on déduira des règles de fonctionnement ; je propose une hiérarchie de plausibilité basée sur la proximité du SSER concerné. Là encore, je considère que le processus de simulation ne peut jamais reproduire parfaitement la réalité observée⁵¹, produisant des représentations progressivement asymptotiquement meilleures de la réalité mais ne l'atteignant jamais.

Une fois ceci assumé, je propose la hiérarchie suivante dès lors qu'on ne dispose pas d'informations directement issues de la société considérée :

1. *"Ad antiquitatem" ou antériorité* : si une famille ou un groupe social a eu tel fonctionnement, on peut considérer qu'il s'agit d'une potentialité pour la société étudiée sur le même territoire ou ayant un lien historique ; cependant, aucune information ne peut être déduite de l'absence de données sur les règles anthropologiques passées. Ainsi, on peut juste poser une plus grande plausibilité à ce qu'une règle anthropologique active dans le passé et sur le même territoire ou pour la même société soit probablement présente dans la société concernée. Par exemple, on pourra envisager qu'un modèle de sociétés issues du droit romain fonctionne probablement sur le principe du *pater familias* dans les échanges intrafamiliaux ;
2. *"Ad populum" ou majorité de la proximité* : si une famille ou un groupe social est apparu dans une culture voisine géographiquement ou culturellement et, plus encore, dans la majorité des cultures voisines, on peut considérer qu'il s'agit d'une potentialité non négligeable pour la société étudiée. Comme contre-exemples, il est arrivé que des règles anthropologiques soient apparues ou se soient cristallisées dans des sociétés par une opposition culturelle, ethnique ou de classe (Todd, 2011) ou par d'autres mécanismes restrictifs artificiellement imposés par les détenteurs du pouvoir. Il faut donc considérer les dominations culturelles et voir si la règle anthropologique considérée est un enjeu de domination ;
3. *"Primum non nocere"*, ici biaiser le moins possible : les informations sociales sur les sociétés passées sont si lacunaires et imparfaites que je propose d'envisager par défaut des fonctionnements "inoffensifs" créant le moins de biais possible. Ainsi, les règles vues comme "évidentes", envisagées initialement dans le modèle OBRESOC pour la société rubanée étaient patrilineaires par défaut, créant de facto des différenciations puis des stratifications entre familles. Or, aucune stratification sociale n'y a été observé : les tombes sont peu inégalitaires, y compris entre hommes et femmes, les maisons présentent des variations de taille mais ces variations ne se maintiennent pas dans le temps pour les mêmes emplacements de maison (Dubouloz, 2010 ; Gomart et al. 2015). Plus encore, introduire des règles créant des différenciations entre individus dans l'accès aux ressources sans justification, par exemple venant des points 1 ou 2, crée une stratification sociale artificielle à éviter. Ainsi, on ne posera pas une société patriarcale à une reconstitution d'une société archéologique sans traces matérielles de ce patriarcat.

En combinant espace et temps, on obtient une hiérarchie de validité des combinaisons telles qu'indiquées dans le Tableau 11 :

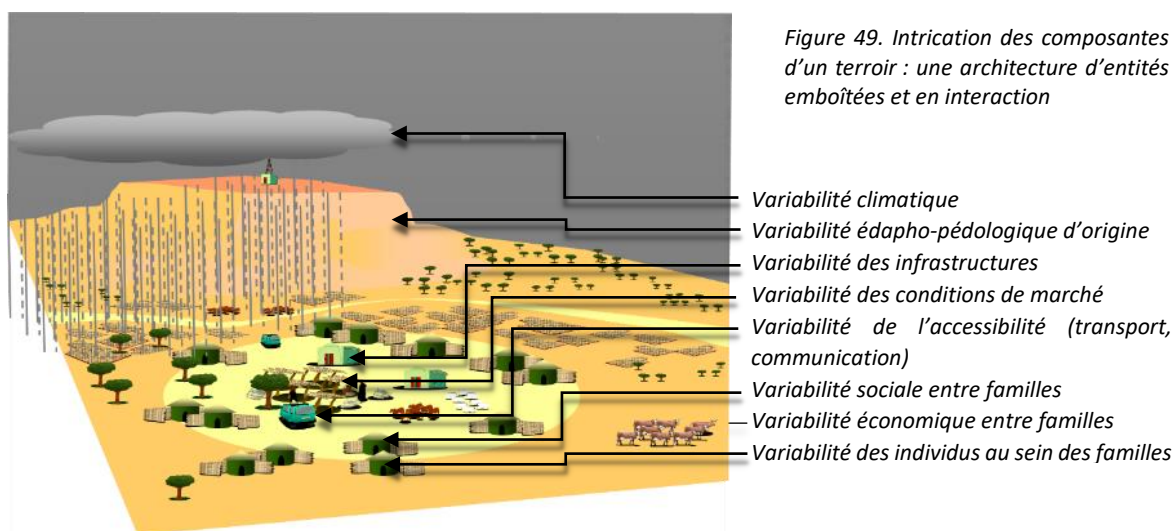
⁵¹ *Quel que soit le sens donné au mot « parfait »*

Tableau 11. Validité des combinaisons de proximités géographiques et temporelles par analogie de données.

	Ère antérieure	Même ère	Ère postérieure
Même territoire	(3) Paquets environnementaux et techniques gérables	(1) situation idéale et	(5) Paquet environnemental gérable. paquet technique à clarifier
territoire proche	(2) Extension basée sur l'hypothèse d'une homogénéité	environnementale locale	
Autre territoire mais écologiquement similaire	(4) et (6) Tendance au déterminisme	(7) Tendance au déterminisme environnemental avec moins de fiabilité que (6) & (7)	
Autre territoire écologiquement différent	(8) et (9) quasi aucune fiabilité : le paquet technique peut éventuellement être théoriquement acceptable		(10) inutile

Les briques sociales pour l'actuel : Approches de terrain : ZADA, ECRIS, Entretiens Semi-Directifs

L'avantage dans l'étude d'une société actuelle est bien évidemment l'accès direct aux différentes rationalités et perceptions. Ainsi, une société vivant exclusivement des produits de sa terre voit sa rationalité appréhendée : on vit principalement de cette terre et les comportements se déduisent aisément de cette triviale conditionnalité. Introduire des variables extérieures comme des prix agricoles, définis ailleurs, dégrade la cohérence du système par ces forçages extérieurs. En pratique, aucune société n'est autonome et ne constitue un système fermé : on échange, on vend, on noue des relations y compris de mariage, on se déplace. La Figure 49 ci-dessous illustre cet aspect emboîté des composantes d'un terroir du Sahel nigérien assimilé à un SSER : rendre compte des multiples actions de l'homme dans et sur ce territoire ou entre les hommes à propos de ce territoire oblige à intégrer et à décomposer ces actions.



En pratique, la méthodologie d'entrée dans le territoire va refléter de manière inversée la construction du modèle. Comme décrit dans la Figure 50, l'appréhension d'un SSER régional doit partir du plus large au plus local, du global au régional, puis au local, au familial jusqu'à l'individuel. Chacune de ces échelles et unités territoriales et sociales fait l'objet d'un mode d'analyse propre⁵².

Cette approche apparemment top/down n'a pour but que de sélectionner à chaque étape la ou les entités les plus représentatives ou de définir les critères de l'échantillonnage. Ainsi, de la région au village, il faut une caractérisation des villages par exemple par le ZADA, pour définir quels villages enquêter et ainsi de suite... La littérature disponible permet un premier survol sur le territoire et son contexte. Ici interviennent les outils collectifs d'enquête au premier chef desquels le ZADA permet d'acquérir une pratique et une connaissance du

⁵² ZADA sur la région, MARPs et ECRIS sur la commune, le terroir, enquêtes qualitatives pour "capter" les variables caractérisant le SSER, enquêtes semi-structurées pour nourrir en "données" et calibrer les dynamiques et évolutions à l'échelle familiale ou individuelle.

territoire en sus des cartes rendant compte des perceptions locales. Comme décrit précédemment, le ZADA donne le contexte, la perception différenciée et, en répétant les cartes, produit une représentation moyenne du territoire, tant d'un point de vue social qu'environnemental. Surtout, la méthode donne à voir la hiérarchie des critères de différenciation du territoire.

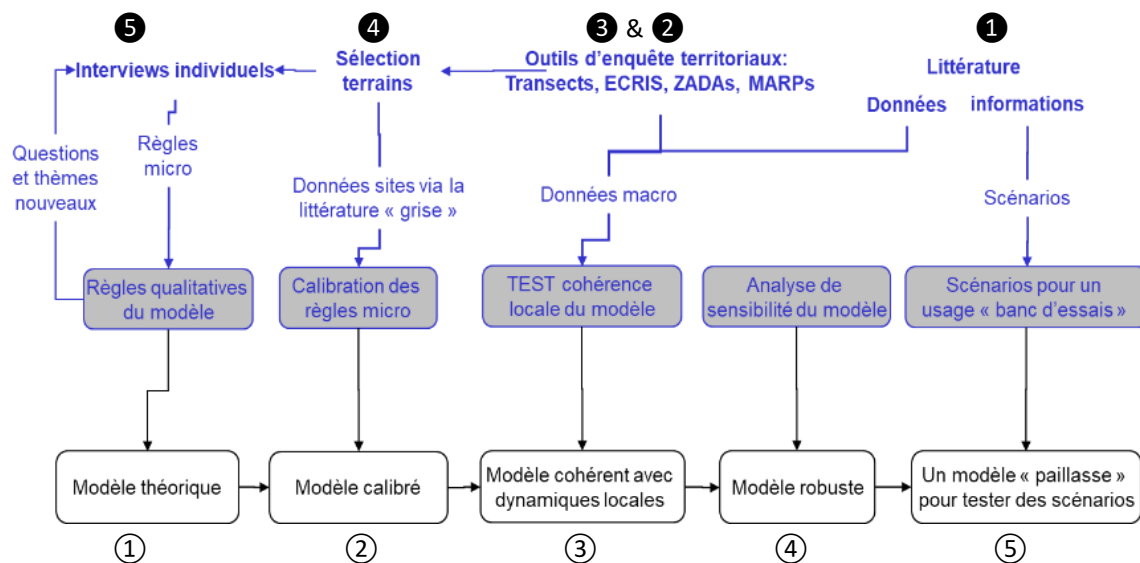


Figure 50. Méthodologie de modélisation de terrain : du régional à l'individuel, du qualitatif au quantitatif.

Les MARPs, que nous avons déjà décrits précédemment, donnent une perception à l'échelle du terroir et de sa structure. Je les ai employées pour avoir un premier aperçu de la structure collective, environnementale et d'usages de villages au nord-est de Zinder. La méthode ECRIS (Enquête Collective Rapide d'Identification des conflits et des groupes Stratégiques) formalisée par Biershenk & Olivier de Sardan (1994) et reprise par ce dernier (2003) donne à voir la dynamique de ce terroir. Plus qu'une énième « approche clé en main » que les auteurs rejettent explicitement, cette approche par les conflits et les rapports de domination renvoient à la perception de toute entité village et terroir comme une arène, un espace politique avec des groupes stratégiques en tension. Cette entrée dynamique est particulièrement riche car elle permet de s'affranchir clairement des clichés et des projections que le visiteur pourrait émettre sur un village, « où règne l'harmonie », d'où qu'il soit. D'autres démarches peuvent être construites sur place, comme sur mon terrain d'étudiant au Vietnam où j'ai dû construire un sondage avec vérification croisée entre agriculteurs pour définir les niveaux d'eau, le nombre de mois de crue et la récolte moyenne.

Cette panoplie d'outils d'enquêtes collectives permet de construire un zonage d'un territoire et de les caractériser, permettant ainsi de définir un échantillonnage raisonné de villages, hameaux ou tout autre type de structure locale⁵³ : c'est à ce niveau que s'opère l'accès aux ressources, en terme social et juridique (au sens de normes sociales et légales) ainsi que les modes de régulation. Cette même démarche s'opèrera à l'échelle des familles et éventuellement des individus, comme décrit plus haut.

Chacune des étapes ne permet pas seulement de décrire l'entité en question mais d'ores et déjà les composantes caractérisant les interactions entre ces entités : ainsi, les entretiens auprès des hommes, des femmes d'un village permettent de rendre compte de la diversité de leurs perceptions et de leurs rationalités mais aussi de proposer l'éventail des interactions qui importent (mariages et autres pratiques sociales d'échange, devoirs sociaux, échanges économiques, etc.). Il restera ensuite à les pondérer et les quantifier. Cette dernière étape se fait en ayant recours à des données extérieures, d'abord pour vérifier que les différentes entités n'ont pas de

⁵³ Comme les canaux dans le bassin du Mékong, les caravanes transhumantes Foulani ou Touaregs, les oasis, les comunas amérindiennes amazoniennes à habitat dispersé, les rivières ou affluents de rivières comme en Guyane.

comportement incohérent individuellement, puis que l'ensemble fonctionne tel qu'observé sur le temps court, le pas de temps puis sur le temps rond, l'année par exemple. Par exemple, les naissances et le nombre d'enfants vivants après 5 ans dans un village sahélien est relativement stable d'une année à l'autre mais dépend des ressources alimentaires : on vérifie alors que le nombre d'enfants simulé est non seulement conforme en moyenne mais aussi en variabilité sur une période passée. L'évaluation de la cohérence sur le temps long, i.e. les tendances et évolutions progressives, comme la croissance démographique mais aussi les réorientations de production du fait d'évolutions de prix, se fait en terme relatifs : par exemple, le taux de croissance de telle production agricole doit rester dans la gamme de la disponibilité de main d'œuvre laissée libre pour les travaux de changement d'occupation des sols. Ce test reste le plus souvent qualitatif et ressort de la calibration (cf. Figure 50). Cette étape est suivie par la cohérence de la variabilité supposée de l'ensemble et non plus seulement d'une portion du système, d'un seul module, et ce, par une analyse de sensibilité qui sera décrite plus avant.

Ainsi, le modèle devient plus adéquat au fur et à mesure que l'on caractérise et précise les entités et les interactions élémentaires. Il gagne en même temps en légitimité et en confiance lorsqu'on regarde l'ensemble du système. On pourra alors considérer le modèle comme « bon pour le service », pour servir de paillasse aux différents scénarios envisagés. L'utilité de ce modèle ne sera visible que dans l'intégration fine des variations observées et leur reproduction dans le comportement des agents sociaux simulés. Ici réside la plus grande versatilité, la plus grande fragilité, mais aussi le plus grand intérêt des modèles SMA autour des SSERs.

5.2.5 Modélisation sociale des SSERs

Une fois construit le décor dans lequel les agents vont évoluer, construire les agents et leur fonctionnement requiert en pratique un nombre limité d'actions. Il faut caractériser les agents humains, familles ou individus, dans ce qui les différencie dans (i) l'accès aux ressources et à l'espace, (ii) les rationalités définissant ce qui les fera utiliser de manière différente ces caractéristiques et ces accès, (iii) les liens reliant les flux et modes d'action entre les niveaux d'entité. Enfin, il faudra vérifier l'absence de biais dans le déroulé de simulation, en particulier à l'initialisation et à l'instanciation.

Les variables familiales et sociales : conditionner les trajectoires aux liens sociaux

Cette section tend à démontrer le puissant impact que les éléments sociaux peuvent avoir sur les résultats de la modélisation. Je fais ici la liste des éléments familiaux qu'il faut formaliser dans la structure des familles à modéliser et j'en montre par quelques illustrations issues de mon expérience leur importance :

Héritage et stratification intrafamiliales par sexe : il faut d'abord noter que l'héritage dans un contexte de faible densité démographique, i.e. la densité par rapport aux terres fertiles, concernerait surtout les actifs mobiles, c'est-à-dire le bétail, la grande disponibilité des terres réduisant leur valeur. Todd (2011) fait l'hypothèse qu'à la naissance de l'agriculture, les sociétés étaient sans ou avec une faible discrimination sexuelle. Il propose comme système de base avant la grande extension de la patrilocalité un système d'origine basé sur l'ambilocalité et l'ambilinearité, que je propose d'adopter par défaut pour les sociétés néolithiques. Les tombes décrites pour la culture rubanée dans le cadre du projet OBRESOC ne laissent effectivement pas paraître de différenciation forte (Bickle, 2020). Sur le principe du *Primum non nocere* (voir §5.2.4.3.), l'hypothèse la plus probable est donc une indépendance entre héritage, dont l'apparat funéraire serait le proxy, et le sexe. Dès lors que celle-ci apparaît, vers le sexe féminin ou (bien plus souvent) le masculin, elle se traduit par une discrimination sexuelle en matière d'héritage. Cette différenciation, par le jeu du hasard dans la répartition des sexes dans une fratrie, crée *de facto* une stratification sociale dont l'ampleur dépend de la force de cette discrimination. Supposons que cette discrimination favorise les hommes et qu'elle soit absolue, c'est-à-dire qu'il n'y ait aucune part de l'héritage donnée aux filles et aucun douaire en compensation. Les familles avec uniquement des filles sont les seules à devoir distribuer leurs ressources à d'autres familles : héritages, mains d'œuvres voire dots. Dans tous les cas, elles ne peuvent conserver de patrimoine. Dans le cas d'une discrimination partielle (par exemple, 2/3 pour les fils et 1/3 pour les filles), avec la patrilocalité, les filles mariées sortent leurs parts héritées du patrimoine familial, "désavantageant" leurs familles d'origine en matière de conservation du patrimoine et avantageant leurs nouvelles familles d'accueil. Cette perte du patrimoine familial est d'ailleurs la raison pour laquelle la règle d'héritage précédente, qui est la règle d'héritage musulmane, n'est que rarement appliquée dans tout le monde musulman (Tillon, 1966) et seulement chez les zélotes : Comme on peut le constater au Nigeria, l'application

stricte de cette règle, propre à certains groupes sociaux, combinée au souci de maintenir le patrimoine familial, pousse à la claustration et au mariage entre apparentés. Au Niger, cela n'est pas appliqué et l'héritage des biens immeubles est uniquement entre hommes, compensée quelque peu par l'existence d'un douaire à payer à la famille des épousées. Les hasards des fratries peuvent jouer un rôle de rééquilibrage de la dynamique permettant de conserver des gains et des pertes équivalents entre les familles. Cependant, les familles et les lignées "avantagées" en fils vont constituer des partis avantageux et, s'ils maintiennent une lignée de fils peuvent maintenir cette accumulation de patrimoine et ainsi de suite au long des générations du fait de l'alliance entre familles fortunées, du fait des héritages et pour certaines cultures, des jeux de douaires ou de dots. Par conséquent, la différenciation aléatoire des sexes ne se compense pas forcément et maintient certaines lignées avantagées. La répartition des droits de transmission comme les autres différenciations sexuelles doit donc être soigneusement étudiée sur le terrain pour éviter toute exagération ou tout oubli qui amplifierait ou amenuiserait ces discriminations dans les simulations.

Héritage et stratification intrafamiliales selon le rang : Familles souches, familles communautaires et familles nucléaires : L'existence d'inégalités au sein de la fratrie fait évoluer les familles par l'apparition de tensions entre ce qu'on donne à la famille et ce qui vous est dû à l'héritage. Cette perception mouvante des types de famille s'oppose à la version structurée de Todd, en tout cas pour l'Afrique sahélienne. Je pense au contraire au vu de mon expérience en Afrique de l'Ouest, et au Niger en particulier, que les idéotypes de famille peuvent changer par eux-mêmes : la famille souche décrite comme d'origine aurait plutôt une origine « défensive » dans une conjoncture (et pas une structure) d'instabilité politique sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest après la chute des empires au 16^{ème} siècle. Les différentes reconfigurations de cette famille-type en deuxième moitié du 20^{ème} siècle seraient dues à mes yeux d'abord à la fin de cette menace permanente, au « vide de terres » qu'il fallait coloniser par de nouveaux villages puis au déséquilibre démographique très récent mais massif entre le seul aîné, héritier présomptif, et le nombre croissant de cadets sans plus d'échappatoire face à la fin des terres libres. Certaines légitimités, comme la religion (musulmane en pays Kanouri, voir Saqalli et al. (Soumis) ou évangéliste en pays Mossi, voir Laurent, 2009), deviennent des arguments pour les « perdants » des hiérarchies sociales⁵⁴ pour réclamer un changement de statut familial, changement lourd de tensions et de conséquences foncières (Boserup, 1965).

Héritage et stratification intrafamiliales selon le rang : Ultimogéniture vs. Primogéniture : un phénomène de discrimination équivalent existe souvent entre les anciens et les jeunes membres d'une même fratrie lors de la transmission. Cela a un effet important sur le pouvoir d'expansion d'une culture : Considérons le cas de la colonisation néolithique, où des familles mononucléaires avec en moyenne deux enfants adultes eux-mêmes associés chacun à leur famille mononucléaire. La famille de l'aîné.e a des enfants statistiquement plus âgés que ceux de l'enfant cadet.te. Les enfants de ce dernier arriveront à l'âge adulte avant ceux de la famille cadette et la capacité de main-d'œuvre de cette famille sera plus rapidement plus élevée S'il y a une différence de 5 ans entre les deux héritiers, l'enfant de l'aîné arrivera à l'âge de 15 ans plus tôt. Si cette culture utilise l'ultimogéniture, c'est l'enfant le plus jeune qui hérite et donc qui reste et le plus âgé qui part. Chaque génération ayant besoin de plus ou moins 30 ans, cela implique une vitesse de colonisation 17% supérieure avec uniquement cette différence anthropologique. Ce simple exemple illustre le poids de ce facteur sur le devenir des lignées familiales mais aussi à l'échelle du devenir de la population.

Stratification intrafamiliales selon le rang : Droits et devoirs créant des discriminations : les différenciations familiales se créent également par les règles de dépendance quant à l'accès à la nourriture, les règles de commensalité qui commandent l'ordre de nourrissage au sein de l'unité familiale (et plus généralement de récompense). Dans des circonstances normales, on associe la préséance à la priorité : les sociétés où les enfants sont prioritaires sont celles où les enfants mangent d'abord, les sociétés où les adultes mangent d'abord sont celles où ces adultes sont prioritaires. Quand on mange ensemble, on ne sait pas qui est prioritaire. En pratique, et j'ai pu l'observer au Niger lors de la famine de 2005 au sud de Maradi, cet ordre définit aussi ceux qui ont priorité en cas de famine au sein de la famille, les adultes faisant force de travail pour les champs, et les autres,

⁵⁴ Cadets, descendants de familles à bas statut, castes, horsos : Olivier de Sardan, 2003b

privés de nourriture ou réduits à la portion congrue, avec les drames que cela implique. De plus, certains événements sociaux créent d'eux-mêmes des différenciations. Le mariage implique pour les hommes mariés de devoir fournir un mouton à la Tabaski au Sahel sous peine de déconsidération : à force d'échecs, ils peuvent être rejetés par leur famille et par leur belle-famille comme incapables. Les femmes ne sont pas forcément bien accueillies dans leur famille d'origine en cas de divorce. Une femme mariée stérile sera méprisée par tous. Les enfants d'un deuxième lit, dans une famille polygame, sont beaucoup moins bien considérés, comme les cadets du premier, etc. L'héritage, le mariage, les devoirs sociaux sont autant d'épreuves face aux normes sociales auxquelles la plupart échouent : tout le monde n'est pas héritier, bien doté, considéré. Chaque événement social créant des changements et des ruptures dans les droits aux ressources et aux biens, les règles correspondantes sont l'occasion d'inégalités nouvelles.

Familles élargies/familles nucléaires (Radja, 2003) : cette différence est un facteur majeur de différenciation entre familles. Les familles élargies, par le simple fait d'être plus grandes, disposent de plus de main-d'œuvre par unité familiale. Plus précisément, le ratio de cette main d'œuvre avec le nombre de bouches à nourrir (ratio de Chayanov : Hammel, 2005) va définir sa résistance aux chocs et le ratio de cette main d'œuvre avec le nombre d'hectares va conditionner la productivité du système de production. Je montre dans Saqalli et al. (2010a; 2010b ; 2013) que la configuration familiale élargie permet aux familles de surmonter les contraintes immédiates de main-d'œuvre grâce à la solidarité familiale qui améliore le ratio de productivité décrit plus haut, pour construire rapidement par exemple des maisons, défricher de nouveaux champs, chasser, pêcher, cueillir et garder un grand troupeau de bétail en même temps. Les familles mononucléaires sont moins rapides dans leur expansion en raison de ces contraintes quotidiennes. Cependant, j'ai montré également dans ces mêmes articles que cette même puissance de transformation fait des familles élargies un système moins robuste aux chocs et aux variations environnementales (par exemple, des sécheresses réitérées au Sahel) et que les famines locales ont alors beaucoup plus de conséquences sur la démographie. Dès lors, j'émet deux hypothèses :

- L'augmentation démographique au Sahel a entraîné le basculement de la majorité des familles élargies vers le type mononucléaire uniquement du fait des tensions intrafamiliales, les grandes sécheresses n'ayant joué que le rôle de catalyseur (Saqalli et al. 2010 ; 2013). Les structures familiales ayant des soutiens, réseaux, accès aux ressources, moyens de production différents, c'est l'ensemble de ces différences qui crée une vulnérabilité différentielle aux chocs (Becerra et al. 2016).
- Dans l'Europe néolithique, une explication majeure de la différence entre les familles de la culture rubanée et les cultures contemporaines et voisines équivalentes, telles que la culture Starčevo, serait le type de familles. Or, la trace de l'organisation familiale serait justement observée dans la configuration des maisons : les maisons rubanées étaient longues, comme composées de plusieurs modules s'alignant les uns après les autres. Cette configuration serait le reflet de l'adoption du modèle de famille élargie par les rubanés, composé de plusieurs familles nucléaires accolées socialement et physiquement, tandis que les maisons Starčevo reflètent le type de famille nucléaire. Cette configuration expliquerait en grande partie la puissance de la colonisation rubanée mais aussi son plus rapide effondrement, sans que cela implique un effondrement démographique massif (Saqalli, 2020) ;

Différenciations interfamiliales : Lignages et autres avantages de départ : Les différenciations entre entités indépendantes qui n'ont aucune obligation d'entraide ont vocation à s'accroître au cours du temps. Sans mécanisme de contrainte ou de contrepartie sociale, les familles (et les individus) voient leurs différences d'accès aux positions de pouvoir comme aux moyens de production et aux ressources naturelles se différencier structurellement par les statuts, les lignages, la disponibilité en main d'œuvre ou en capital (élevage, argent, terres). Mon premier travail dans le delta du Mékong avait montré que l'accumulation de plusieurs petits avantages (accès privilégié aux crédits, aux projets, aux aides, etc.), chacun non déterminant mais tous ensemble constituant un appui non négligeable, expliquait une grande part de la différenciation des trajectoires familiales entre les vétérans de la Guerre du Vietnam et les autres (Saqalli & Dosso, 2011).

Différenciations intergénérationnelles : Enfin, un dernier élément me paraît essentiel à souligner : les effets de l'explosion démographique, bien visibles dans l'espace sahéen, peuvent avoir des conséquences dramatiques : l'article «Exclusions foncières familiales des cadets à l'Ouest du Lac Tchad : un vivier pour Boko Haram ? » soumis dans *Espaces, Populations, Sociétés* propose cette hypothèse : les discriminations pour l'accès à l'héritage

pourraient certes avoir toujours existé. Mais il y a un monde entre une famille de quatre enfants, donc deux frères où l'un hérite et l'autre peut aller s'installer dans les espaces alors libres, et une famille de 8 enfants (moyenne dans l'état de Jigawa) donc 4 frères dont 3 n'auront jamais accès à la terre, frustrés et en colère. Mais cet écart, ce ratio entre parents et enfants, crée un rapport psychologique de négligence perpétuelle et de dépendance des enfants à leurs parents. Ainsi, pour les mêmes conditions, un écart apparaît entre les générations favorisées, celles où la terre est abondante et l'accès aux parents aisés, et la génération actuelle.

Les rationalités : atteindre la zone de Boucle d'Or de la complexité efficace

Modéliser des sociétés, c'est aussi formaliser des rationalités. Je définirais ici la rationalité comme la capacité, toujours limitée, à faire des choix entre les pratiques, les activités et les mécanismes sociaux, y compris les normes et les règles. Cette rationalité peut ne pas être explicitée comme « évidente », basée sur un arbitrage entre composantes de production. J'ai montré qu'introduire dans ces rationalités des composantes sociales (matrimoniales, de transmission, etc.) qui empruntent à la théorie des jeux, est non seulement essentiel mais n'est pas si compliqué dans un modèle multi-agent : il suffit d'introduire des variables paramétrées comme relatives, dont les seuils vont mimer les seuils observés : telle tension comme la tension anticlan est modélisée pour franchir un seuil mimant celui observé dans les familles au Sahel (Saqalli et al. 2013), reproduisant le phénomène voulu. Là encore, ces ajouts sont toujours basés sur une rationalité mais la seule différence est qu'ils ne sont pas basés forcément sur des indicateurs matériels. Modéliser des sociétés à la rationalité complexe donc des sociétés réelles est possible.

Cette démarche est nécessaire : Rationalités et pratiques sont nécessaires pour caractériser les dynamiques familiales et sociales, et ces dernières sont nécessaires pour reconstituer le fonctionnement des sociétés. De facto, toute variable nécessaire à la modélisation de la composante sociale d'un SSER, qu'elle soit passée, présente ou prospective, peut être utilisée pour constituer une composante de la rationalité, dès lors qu'elle apparaît comme importante pour le fonctionnement et la bonne compréhension du système modélisé.

Mais comme dit précédemment pour la partie « décor », le degré de complexité à choisir pour le comportement des entités humaines est conditionné d'abord par la question de recherche ou plus précisément par la distance relative de la variable ici, la rationalité, définie par son rang et son poids, à l'objectif du modèle et donc de l'échelle de macro-observation, à savoir le devenir des SSER. Une trop grande complexité améliorera la finesse du comportement des agents mais ne permet ni de tester les scénarios et de comprendre la dynamique du modèle, ni d'effectuer une analyse de sensibilité même partielle étant donné le grand nombre de paramètres (Chattoe, 2000 ; Amblard et al. 2006 ; Schutte, 2010). Plusieurs synthèses, telles que celles de Verhagen & Smit (2003), Axelrod (2006), An (2012), Jonker et al. (2013), Livet et al. (2014), Malawska & Topping (2016) ou Abar et al. (2017) formalisent le dilemme entre les relations sociales et la complexité des rationalités des agents. Plus un agent est complexe, plus son comportement doit être explicité et justifié thématiquement car toute règle introduite pour optimiser une fonction peut établir différentes formes de comportement "forcé", chacune applicable aux différentes fonctions d'un agent. L'établissement de mécanismes hiérarchiques, rang et poids en tête, peut aider à faire face à la complexité de ces hiérarchies.

Je propose de suivre un comportement d'abord séquentiel : Il s'agit de commencer à faire tourner le modèle avec une rationalité limitée à "Les gens font ce qu'ils ont à faire quand ils doivent le faire" afin de calibrer le système. Puis, l'idée est de rajouter progressivement des niveaux de complexité pour approcher asymptotiquement le comportement individuel vu sur le terrain (et jamais l'atteindre) et de fait réussir un test de Turing auprès du thématicien (Lassègue, 1996). Un exemple peut illustrer ces positionnements :

1. Un modèle de description des systèmes agricoles peut être volontairement limité à la reproduction des cycles de culture et à d'autres allocations de ressources tout au long de l'année. L'objectif est d'obtenir la reproduction apparente des différentes actions, en rendant les agents simplement réactifs : "Les agriculteurs et les autres utilisateurs utilisent les ressources à un moment donné et par un moyen particulier", sans objectif assigné. Ils font ce que nous voulons et nous observons les résultats à une échelle plus globale pour voir si cela correspond aux données globales, archéologiques, économiques ou spatiales.
2. Trouver la raison pour laquelle les gens font ces activités de cette manière signifie introduire des hypothèses sur les objectifs des acteurs et sur leur rationalité et par là leur croyance : c'est construire par défaut un

modèle Belief-Desire-Intentions (Haddadi, 1996). Ces objectifs peuvent encore être rendus aussi basiques que possible : "Les agriculteurs et les autres utilisateurs gèrent leurs moyens de production de manière à atteindre au mieux leurs objectifs, à savoir manger tout au long de l'année".

3. Explorer l'espace des paramètres de ces rationalités, le spectre dans lequel ces rationalités et pratiques peuvent s'adapter, nécessite la mise en œuvre de scénarios⁵⁵ : "Les agriculteurs et les autres utilisateurs cherchent à atteindre leurs objectifs respectifs en négociant avec les règles déjà établies, en pratiquant diverses activités et en les gérant, et, éventuellement, en modifiant leurs objectifs". Et ainsi de suite, le raisonnement s'affine pour passer de la réaction à la cognition, du simple au complexe, mais aussi de l'information résultant directement des données à la traduction d'hypothèses sur le comportement et la rationalité.

Les avantages de cette approche sont doubles : il est plus simple et robuste de programmer un schéma simpliste, à l'approche KISS, puis de voir son fonctionnement, d'explorer ses variations de le calibrer, puis de régler en affinant sa complexité plutôt que d'envisager *ab initio* un comportement complexe, de type KIDS, qui serait pourtant suggéré par le terrain. De plus, on vérifie et identifie plus facilement les écarts et les variations du modèle lors de l'ajout d'une nouvelle composante et on se familiarise ainsi avec l'espace des paramètres du modèle, qu'ainsi, on « apprivoise ». Les résultats sont plus stables en termes d'adéquation aux données d'origine et plus robustes face aux effets de seuil introduits par toute fonction d'optimisation.

Les liens sociaux aux ressources : points cruciaux et conditionnalités

Combiner aux bonnes échelles et avec l'influence la plus adéquate, tenu compte du rang et du poids, les interactions entre les éléments sociaux et l'environnement est un problème récurrent dès lors qu'il s'agit de rendre compte de dynamiques sociales et économiques sur un territoire. Or, ces différentes composantes sont reliées entre elles par des variables à paramétrer. Le poids de ces paramètres joue un rôle déterminant dans la robustesse ou la sensibilité du SSER.

1. *Le facteur rare* : Les actifs techniques et pratiques⁵⁶ définissent la productivité différentielle de chaque famille ou toute autre entité humaine. Celle-ci est, comme la vitesse de toute harde conditionnée par le membre le plus lent, conditionnée par la ressource la plus rare. Il est surprenant que la surface soit souvent considérée comme cette ressource rare, illustré par le fait que l'indicateur de productivité immédiatement en tête quand on parle de productivité de l'agriculture soit le rendement à l'hectare. Or, cela n'est vrai que pour des systèmes où celle-ci est plus contrainte que la main d'œuvre, finalement les systèmes intensifs en main d'œuvre d'Asie de l'Est et du Sud, des Andes, du Maghreb ou d'Égypte, d'Afrique dense comme dans les Grands Lacs, en Éthiopie ou au Nigeria et l'Europe jusqu'au milieu des années 60. Depuis, l'Europe s'est alignée pour sa plus grande part sur le modèle américain où c'est le temps de travail qui pose problème (les OGMs ont été créés d'abord pour réduire le nombre de passages de traitements). Surtout, historiquement, le plus souvent et quasi sur tout le globe, c'est bien la main-d'œuvre qui manquait : c'est le cas pour toutes les sociétés préhistoriques et pour une grande partie des sociétés antiques⁵⁷ et préindustrielles. Les zones de colonisation ou de recolonisation agricole actuelles comme ceux que j'étudie en majorité⁵⁸ sont par définition ceux où la main d'œuvre est la ressource rare absolue.
2. *La croissance démographique* et sa sensibilité à la disponibilité alimentaire, cette dernière étant définie en fonction de la productivité liée à l'économie, l'écologie et la société (Bocquet-Appel & Naji, 2006 ; Bocquet-Appel & Bar-Yosef, 2008 ; Bocquet-Appel, 2012). Sur le temps long de la génération, cela définit la puissance des différents groupes humains pour transformer leur territoire. Cependant, des frictions peuvent apparaître dans cette expansion, des nœuds conjoncturels où la disponibilité en nourriture pose problème.

⁵⁵ *Prospectifs pour l'actuel, archéologiques pour le passé. Les scénarios désignent d'autres sites et environnements et contextes (introduction de normes, innovations, changements sociaux ou institutionnels, nouveaux territoires, etc.).*

⁵⁶ *C'est-à-dire l'ensemble des composantes paramétrant toutes les activités de production et économiques pratiquées et utilisées par la population concernée pour vivre.*

⁵⁷ *Sauf dans de rares situations comme l'Égypte ancienne, où la terre était encore plus rare.*

⁵⁸ *Sahel, Amazonie et Néolithique, la Méditerranée faisant exception*

un exemple, porté par le ratio de Chayanov l'illustre : des groupes de colons aux nombreux enfants ont une période critique, d'une dizaine d'années, où les besoins en nourriture pour ces jeunes ne sont pas compensés suffisamment par une plus grande production qu'apporterait leur main d'œuvre encore trop faible. Mais ce genre de nœuds peut aussi apparaître dans l'inadéquation entre réseaux routiers trop faibles pour desservir des bassins de consommation en croissance. Une attention est donc à porter sur ce genre de contraintes conjoncturelles, qui doit être évaluée comme résultat de simulation véritable ou effet de l'instanciation du modèle qui devra être lissée (voir § suivante) ;

3. *La configuration géographique et temporelle* de certaines pratiques joue un rôle sur la pérennité de cette activité. Pour les SSERs non océaniques, la pêche est bien évidemment conditionnée par la présence de plans d'eau quand la chasse dispose potentiellement d'un plus vaste espace terrestre. Mais la paramétrisation, géographique ou dans le temps, de la pratique de cette dernière peut permettre son maintien sur un plus ou moins long terme. Par exemple, nous avons montré dans Van Vliet et al. (2010) que le maintien de l'activité « chasse » sur des sentiers familiaux crée de facto un refuge pour le gibier, de même que Rouchier et al. (2000 ; 2001) ou Maury (2004) en simulant les mouvements des troupeaux montrèrent que la topologie joue un rôle important sur la répartition de la pression sur les terres et les ressources. Ceci est également valable dans le temps même sur des situations où ce ne sont pas les conditions environnementales, en particulier climatiques, qui déterminent le calendrier : ainsi, l'augmentation du poids de la migration saisonnière dans les revenus familiaux chez les Zarma a décalé les dates de mariage donc une partie des attributions de terres de la période de la récolte au retour des migrants, en début de saison de culture.
4. *Pluriactivité* : L'assimilation système de production agricole et d'élevage – domaine de cohérence des prises de décisions renvoie à la situation particulière des systèmes de production motorisés, d'agriculteurs mono actifs se trouvant à la tête de ce qu'il est convenu d'appeler une exploitation agricole. Le concept de système de production agricole s'applique ainsi alors à l'échelle de l'exploitation. Mais cette conception perd de sa valeur dans les systèmes familiaux non-industriels. Milleville (1989) remarquait pour le Sahel dans son ensemble : "Dans bien des cas, les systèmes de production agricole ne constituent que des composantes de stratégies paysannes ou rurales élargies, qui débordent non seulement de l'activité agricole mais également de la sphère locale". Or, la pluriactivité est une constante structurelle des sociétés rurales, en particulier sahéliennes mais pas seulement. Son existence n'a pas pour origine des stratégies de contournement d'une crise contemporaine (mondialisation, bouleversements sociaux, fléaux écologiques...) mais est une caractéristique originelle des sociétés rurales (Paul et al. 2003). En d'autres termes, on ne peut comprendre le fonctionnement des familles concernant l'activité agricole (travail, capital financier et technique, foncier), sans référence aux autres activités (commerce, migration, transhumance). Ce système d'activité constitue le véritable domaine de cohérence des pratiques et des choix de la famille rurale (Goody & Goody, 1976).
5. *Pluri-objectifs* : D'autre part, les stratégies familiales ne se comprennent qu'à la lumière de stratégies plus larges. Le domaine de cohérence des prises de décisions n'est pas forcément fondé uniquement sur un raisonnement de production, même basé sur la sécurisation. Harragin (2006) et nos propres enquêtes montraient le poids énorme (entre 40 et 45% des ressources dédiées) aux échanges sociaux (baptêmes, tabaski, cadeaux, dons). Ce poids peut être interprété économiquement, comme un système d'assurance mutuel avec réassurance lors d'évènements sociaux (« en invitant tout le monde, je montre que j'ai conscience et que j'ai habituellement la capacité de répondre aux devoirs sociaux et par là, je montre que je suis digne d'être soutenu et assisté en cas de catastrophe familiale, qui serait alors conjoncturelle »). Bien sûr, ce raisonnement est le plus souvent inconscient, mais je l'ai cependant vu exprimé formellement, paradoxalement d'abord par des épouses qui en avaient peut-être une vue plus détachée. Quelle que soit la manière d'être interprétée, cette pluralité d'objectifs nuance l'optimisation des ressources et rappelle le poids des facteurs sociaux dans la rationalité de la famille rurale.
6. *Pluri-rationalité* : une fois encore, comme il a été dit précédemment, le modèle du *pater familias* n'est pas une évidence hors du monde agricole motorisé et commercial de l'espace culturel occidental. Dans la majorité des cas rencontrés (en Amazonie ou en Afrique sahélienne ou de l'Est, moins nettement au Vietnam ou au Laos), l'autorité sous une seule direction le plus souvent paternelle n'existe pas et la famille est souple : les membres de la famille travaillent en commun sur les mêmes actions à des occasions rares et ritualisées (la récolte par exemple) ou lors de conditions "limites", d'urgence (soudure, famine...). Les activités sont individualisées et cadrées, pas seulement par défaut où certaines activités risquées ou

contraignantes seraient simplement "laissées de côté" par les dominants (les hommes, les aînés) mais attribuées à certain.e.s et individualisé.e.s y compris dans la rétribution : le chef de famille n'a pas droit à prendre ces gains ou la part prise est formalisée et légitimée par les besoins de la maisonnée. Certes, les écarts à cette norme sont légion surtout dans des structures familiales dysfonctionnelles mais la norme demeure ;

7. *Plasticité de l'interaction hommes-milieux et histoire* : Comme dit précédemment, le fonctionnement des familles quant à leur dispersion et les choix de colonisation et de déplacements géographiques, conditionne certes la puissance d'expansion d'une société et sa sensibilité à des paramètres définis écologiquement, conditionnant elles-mêmes la gamme des œkoumènes possibles de cette culture. Mais cette interaction hommes-milieux n'est pas unique : dans les milieux très contraints comme les déserts ou les steppes, deux systèmes sont possibles et d'ailleurs coexistent, systèmes agropastoraux extensifs et systèmes agricoles plus intensifs (le degré d'intensivité est relatif au SSER). Dans des systèmes peu contraints en termes de disponibilité des ressources, l'eau au premier chef, milieux tempérés et milieux tropicaux humides (ou mêmes secs dans une gamme de faible densité démographique, combinant une forte disponibilité en eau par personne avec une moindre prévalence de maladie à vecteurs et parasitaires), les contraintes pour l'obtention de nourriture restent faibles. Il n'existe pas un système mais plusieurs dizaines, tous cohérents socialement, économiquement, écologiquement et agronomiquement : entre chasse-cueillette, systèmes triennaux sans jachère avec saltus importants et main d'œuvre uniquement masculine, agriculture sur brûlis itinérante, agroforesterie associant sous taungya horticulture, céréales et légumineuses ou systèmes biennaux à jachère longue, les manières de se nourrir de la terre sont très nombreuses sur un même biome créant autant de sociobiomes possibles. Le tableau 11 en §5.2.4.3. illustre les conditions pour cette variabilité mais ainsi cette même variabilité potentielle. Plus cette plasticité est avérée, par l'observation de plusieurs systèmes en même temps, ou conceptualisée, par l'analyse des potentialités du milieu et de la technicité de la société, plus on se doit de chercher dans l'histoire les raisons ou faisceaux de facteurs ayant amené la société actuelle à fonctionner de la ou les manières observées. P. Valette cherche par la géohistoire (Valette, 2011) à formaliser au travers de l'histoire le lien entre paysages et société. Je propose ici d'étendre cette approche aux systèmes d'activités pris dans leurs diversités mais aussi de réintégrer les événements historiques, en particulier les événements juridiques, démographiques, de violence⁵⁹ dans une vision écologiste et structuraliste de l'histoire locale. C'est bien la conquête violente du Maroc entre 1912 et 1933 (6 à 7% de la population tuée : Gershovich, 2012 ; Rivet, 2012) puis l'accaparement par la colonisation française qui explique l'organisation du bassin du Tensift actuel et pas une quelconque adéquation hommes-milieux venue du fonds des âges⁶⁰.

Les liens sociaux aux ressources : échelles et configurations de modèles

Rassembler tous ces éléments dans un seul modèle est un défi car ils ne correspondent pas forcément à la même échelle spatiale et temporelle : ces liens aux ressources peuvent se décliner différemment selon la maille temporelle, spatiale et l'entité choisie. Dans un monde parfait où les contraintes informatiques ne seraient pas un problème, modéliser ces règles doit se faire dans l'échelle où elles agissent effectivement, l'individu relié, conditionné et contraint ou favorisé par les différentes connexions sociales qui définissent dynamiquement son statut (Gilbert & Troitzsch, 2005). Mais la contrainte en termes de puissance de calcul se traduit dans la réalité par différentes voies. Plus les facteurs sociaux mis en œuvre sont nombreux, plus chaque agent est compliqué à modéliser et à calibrer, plus le modèle a besoin de nombreux agents villageois pour couvrir les différentes situations socio-écologiques⁶¹ mais aussi les différentes interactions existantes⁶² et le poids statistique des

⁵⁹ Car tous trois affectent le plus la vie des sociétés et leur accès différentiel aux moyens de vie

⁶⁰ Cela s'est traduit dans l'effondrement démographique des années 20, l'abandon du pastoralisme extensif dominant, la mise en place de grandes fermes de colons français, puis la réorganisation en un système quasi-latifundiaire mêlant petites fermes et domaines agro-industriels avec un repeuplement extérieur pour fournir de la main d'œuvre.

⁶¹ (Rechercher la diversité des situations)

⁶² (Rechercher la diversité des configurations sociales)

différents types d'entité humaine⁶³, plus le modèle sera gourmand en temps pour la construction même du modèle mais aussi la vitesse informatique des simulations.

Des reconstructions plus ciblées dans le temps et dans l'espace sont mieux adaptées pour répondre aux besoins de l'équipe en charge de la question de recherche. En particulier, le choix des échelles de validité conditionnera les mailles spatiales choisies du local au régional⁶⁴. Le recensement des modèles, certes de manière non exhaustive, me permet de proposer une classification de ces modèles en quatre catégories, différentes par leurs échelles et leurs moteurs, que je présente selon une matrice de catégories combinant échelles d'une part et disciplines sources d'information d'autre part (Saqalli et Baum, 2015) :

- Mailles et échelles :
 - a) L'unité village/hameau et le territoire correspondant, autrement appelé finage ou plus souvent terroir, est souvent utilisée car il s'agit de l'unité fonctionnelle de gestion d'un paysage, expression géographique d'une combinaison de rationalités qui doivent interagir entre elles. Construire un modèle d'une entité simulée en dessous de ce niveau est rendu difficile compte tenu de l'importance de ces interactions, qu'elles soient directes (interactions sociales mais aussi soutien mutuel de la main-d'œuvre par exemple). En gros, c'est le niveau auquel la rationalité micro-économique peut être prise en compte pour analyser et expliquer les différences dans l'utilisation des ressources naturelles. C'est la configuration de SIMSAHEL, de PASHAMAMA ou d'OBRESOC local ;
 - b) Le territoire d'une culture ou d'un groupe de cultures. En gros, c'est le niveau auquel la rationalité macro-économique peut être évaluée, en supposant une certaine homogénéité concernant l'utilisation des ressources naturelles au sein de cette culture par rapport aux autres. Un des principaux aspects consiste ici à analyser les impacts d'une rationalité homogène concernant l'utilisation des ressources et leur déclinaison hétérogène selon les combinaisons locales situées de configurations sociales et environnementales, que l'on retrouve dans OBRESOC global ;
- Disciplines impliquées :
 - c) Les sciences sociales sont utilisées comme points d'entrée principaux pour le modèle et les résultats attendus se concentrent sur les questions paléoenvironnementales : la question de recherche se déclinera ainsi par exemple dans un modèle où telle configuration culturelle et sociale verra testée son adaptation à différents biomes ;
 - d) Les données paléoenvironnementales sont utilisées comme points d'entrée principaux pour le modèle et les résultats attendus se concentrent sur les questions sociales, archéologiques ou socio-économiques : la question de recherche se déclinera ainsi par exemple dans un modèle où tel environnement sera colonisé par différentes cultures et sociétés qu'on essaie de caractériser ;

Quatre configurations, certes simplistes, peuvent être identifiées. Nos travaux (Saqalli & Baum, 2015) et Saqalli et al. 2019) élaborent plus avant cette différenciation :

- Configuration ac). A l'échelle locale (c'est-à-dire le village ou le groupe de villages), les travaux fondateurs de Kohler, Axtell, Epstein, Janssen et d'autres (Axtell et al. 2002 ; Janssen et al. 2003 ; Janssen, 2009 ; Kohler et al. 2012) sur les Anasazi donnent la priorité à la contrainte en eau. Un modèle équivalent (Baum, 2014) explore les différentes pratiques concernant l'utilisation des terres au niveau du village : les conditions environnementales sont acquises et connues et on teste différentes configurations sociales ou modes d'utilisation des ressources.
- Configuration ad). Le modèle de Conolly et al. (2008) analyse la diversité de l'ensemble des plantes cultivées et la relie aux perturbations et à la diffusion de l'environnement.
- Configuration bc). Au niveau mondial, GLUE (Wirtz et Lemmen, 2003) explore la transition vers l'ère néolithique grâce à un ensemble de techniques transmissibles qui se développent à travers la colonisation et les modèles diffusionnistes de l'Ancien Monde, en se concentrant sur certaines zones et en explorant des

⁶³ (Rechercher la représentativité)

⁶⁴ L'échelle est la taille de l'ensemble du territoire simulé, à différencier donc de la maille qui est la taille de l'entité élémentaire

hypothèses climatiques déterministes (Lemmen & Wirtz, 2014), que l'on peut comprendre comme étant un test de différentes configurations sociales sur un même écosystème. Le modèle de Bernabeu et al. (2015) traite des modèles d'expansion du néolithique.

- Configuration ad) et bd). Le projet ANR Obresoc avait clairement deux objectifs divergents. Il fallait reconstituer le système de culture rubané, localement, et reconstituer l'expansion puis le déclin de cette culture globalement. Il dût être scindé en deux modèles différents, l'une portant sur la cohérence et le fonctionnement du système de production et d'activité au sens de Mazoyer & Roudart (1997) y compris les systèmes d'élevage et d'exploitation (Saqalli et al. 2014) focalisant ainsi sur la configuration ad) et l'autre sur une configuration bd) à l'échelle de l'Europe pour une reconstitution de l'expansion des rubanés.

Cette classification a été affinée dans Saqalli & Baum (2015) pour les modèles du passé. Elle reste à affiner pour les modèles actuels mais cette action n'est pas une priorité car elle a pour vocation à être en perpétuel chantier. Cependant, en guise de conclusion partielle sur cette section, le regard classificatoire proposé, combiné avec cette série de regards que je propose sur le modèle à construire, est une proposition de mise en recul de la démarche de modélisation, afin de faciliter et son adéquation à la question de recherche et son évolutivité comme outil d'exploration du SSER considéré.

Initialisation et instanciation : éviter les distorsions initiales

Les modèles basés sur les agents sont définis dans le temps. À $t=0$, quelle que soit la signification de la longueur du pas de temps, de nombreuses fonctions sont lancées avec par défaut des valeurs qu'on espère acceptables. Mais à l'initialisation même, la valeur de chacune de ces fonctions a un impact énorme et ce problème du trop grand impact des conditions initiales est fort bien connu (Amblard et al. 2006 ; Grimm et al. 2006 ; Bommel, 2009). Cela a également pour origine le fait que l'histoire est un processus permanent sans commencement: toute histoire racontée ou simulée sur un territoire, même entièrement nouveau et initialement vide d'hommes, voit la date de son commencement définie de manière totalement artificielle : des dynamiques environnementales étaient déjà présentes sur le territoire et ont leur inertie, de même que des dynamiques sociales et économiques affectaient déjà les groupes humaines et avaient également leur inertie. Le fait de poser une date a priori crée des distorsions et de grandes variations dans les sorties des premiers pas de temps, surtout si les valeurs d'initialisation sont très différentes des estimations moyennes. De plus, voir des fluctuations non historiques est très dépréciatif pour l'apparence des résultats du point de vue des thématiciens.

On peut dès lors proposer, comme c'est le cas dans les approches KISS (Edmonds et Moss, 2005), de considérer une première période d'initialisation comme non valide, en considérant que c'est le temps nécessaire au système de s'auto-ajuster. Cependant, cette distorsion peut subsister. Même si elle n'est plus détectable sur la variable considérée, elle peut s'être transmise à d'autres variables. Par exemple, un peu trop de naissances en début de simulation ne se verra plus au bout de 150 ans de simulation mais aura un impact fort sur la distribution des héritages et donc des inégalités entre familles. Je propose alors de réduire autant que possible les fluctuations correspondantes en supposant, par exemple, de calibrer les valeurs d'initialisation comme de simples moyennes déduites des premiers tests de simulation pour que le déroulé de départ soit le plus lisse possible. On peut alors suggérer de mesurer la stabilité des solutions afin de raffiner cette recherche de réduction de la distorsion de l'initialisation avant d'utiliser le modèle pour des explorations ultérieures.

En pratique, à chaque instanciation, i.e. à chaque création d'une entité, famille ou individu, le même problème se pose à une plus petite échelle en termes d'impact sur la simulation dans son ensemble. Dans le cas d'une instanciation qui mimerait un évènement naturel à savoir simplement une naissance, mimer les caractéristiques d'un agent à la naissance est le plus évident comme j'ai procédé sur le modèle SIMSAHEL. Dans d'autres cas plus conceptuels (création d'une famille, d'un village), il est préférable d'appliquer les recommandations sur l'initialisation sur l'instanciation d'entités. L'instanciation d'une famille, par exemple une famille migrante arrivant en Orient dans le modèle PASHAMAMA, doit « lisser » ses effets sur le territoire : pas de budget supplémentaire, pas d'avantages pratiques, pas d'autres éléments qui puissent fausser à leur avantage leur situation spécifique initiale, à moins que cette variabilité et cette inégalité n'aient réellement existé et doivent donc être intégrées dans le modèle.

cette plate-forme qu'on considère comme valide pour tester des hypothèses, sur ce même terrain ou d'autres⁶⁷. Plus précisément :

Étapes ①&② : Les calibrations internes du modèle ont été faites de manière à ce que les comportements des entités individuelles se comportent comme demandé, que les résultats collectifs de ces comportements correspondent à ceux observés sur le terrain. On peut envisager le test de Turing (Lassègue, 1987), à savoir présenter des sorties de modèles compilées à l'échelle macro à un spécialiste de ce territoire afin qu'il voit la moindre incongruité. Cela ne prouve en rien la validité du modèle et au contraire constitue une boucle de raisonnement si ces informations ont été initialement intégrées dans le modèle mais cela diminue la possibilité que le modèle fasse n'importe quoi : en gros, cela permet de considérer que le modèle est un bon miroir, certes simplifié de la réalité ici simulée ;

Étape ③ : La comparaison avec des données extérieures (Amblard et al. 2006) : celles-ci sont utilisées afin de confronter les sorties du modèle. Par conséquent, on compare des données agglomérées du modèle à l'échelle macro avec ces données extérieures et un seuil de confiance doit être au préalable posé, via un degré de significativité dans les tests statistiques par exemple. Cela impose que les données de confrontation du modèle n'aient jamais été utilisées pour la construction de ce modèle. Comme ces données sont considérées comme la référence du réel, elles doivent être de grande qualité. Par conséquent, cela impose de ne pas utiliser les meilleures données disponibles pour un modèle, en particulier si celles-ci sont précises mais partiellement exhaustives, par exemple sur une dimension seulement, par exemple le temps, mais pas sur l'espace. D'autre part, le nombre de points à tester statistiquement est un critère important de confiance sur le test. De plus, la notion de seuil d'acceptation apparaît ici : les simulations sont rarement parfaitement en adéquation avec les données extérieures en terme absolu. Observer des dynamiques et des configurations équivalentes, par exemple avec les mêmes changements ou vitesses de croissance, ou les mêmes ordres de grandeur dans les compositions ou la disposition de l'usage du sol ou de la couverture végétale est un argument en faveur de la solidité du modèle. Attendre une adéquation parfaite au pixel et à la date exacte est impossible et n'a pas de sens. Enfin, cette restriction en termes de puissance de validation possible a aussi pour origine le fait que toute comparaison se fait le plus souvent sur une moyenne de simulations : celles-ci voient leurs sorties différer d'une itération à l'autre par le « bruit » des facteurs aléatoires du modèle⁶⁸. On comprend dès lors qu'on travaille dans une comparaison de gammes de « validité », sorties de simulations et bruit d'un côté, résultats de terrain et marges d'erreur de l'autre. Deux types de confrontation sont considérés :

- Sur le temps long : en l'absence d'une série de données sur une période longue et sur un vaste territoire, la validation est en fait une série de tests de confirmation ponctuels. Le flou archéologique sur les datations exactes de données de sites impose de considérer chacun des points pour lesquels on dispose de données comme indépendant. Ainsi, la seule comparaison envisageable pour les reconstitutions environnementales de PALEOMEX serait de comparer pour chaque site géographique du Languedoc-Roussillon où on dispose de données, pris chacun comme un test, la série de données de terrain avec la série simulée mais cela seulement pour la seule période de validité de la donnée de terrain. C'est l'accumulation de points où les comparaisons fonctionnent qui définira si la simulation est valable ;
- Sur le temps court : la rétrospective est une comparaison sur une période considérée comme non homogène (Paegelow et al. 2004), i.e. une période où l'on souhaite voir des tendances et donc pour laquelle on dispose de plusieurs images ou séries de données. On compare alors les images ou des séries de données simulées avec des images ou des séries de données non utilisées comme entrées dans le modèle. C'est ainsi une comparaison globale qui est faite. Ainsi, la « validation » du modèle PASHAMAMA s'est faite en comparant rétrospectivement les évolutions des couvertures végétales simulées et observées par satellite (Houssou et al. 2019) puis les usages de sols (Méjean et al. 2019) sur les périodes les plus longues possibles, entre les débuts de la colonisation de ce territoire amazonien et actuellement (Figures 19 et 20). On voit ainsi

⁶⁷ Par exemple, le système d'héritage et sa connexion avec la moindre disponibilité en terres est principalement issue de Raynaut et al. (1997), Luxereau & Roussel (1997) et Boubacar (2004).

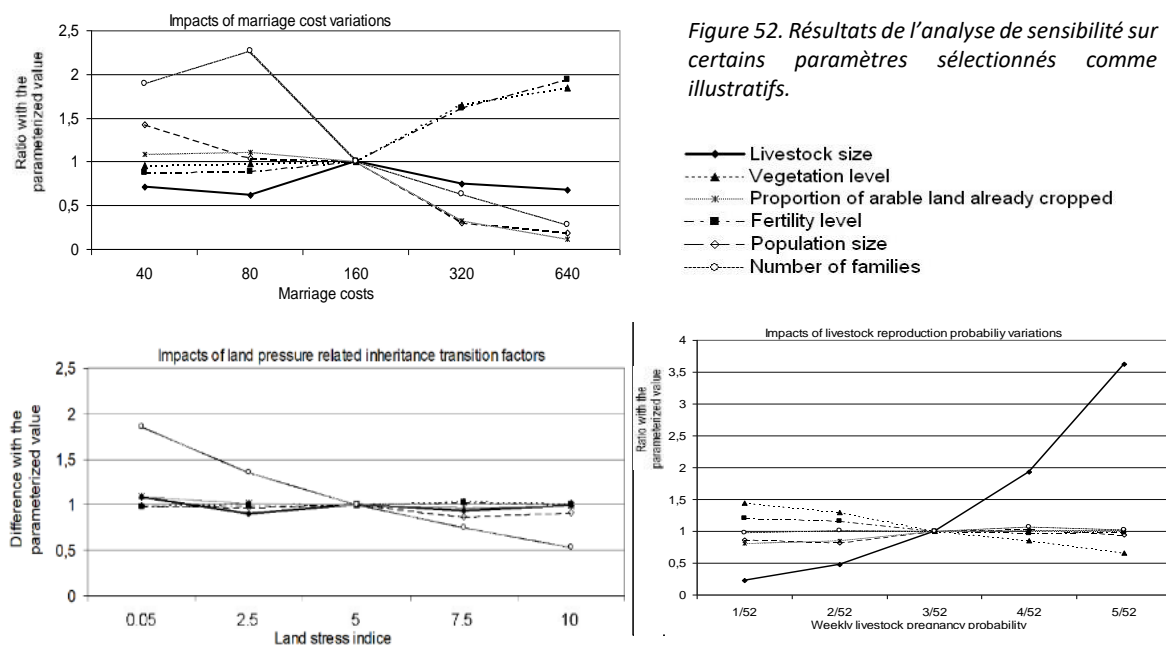
⁶⁸ Variabilité des pluies, sex-ratio dans les familles, etc.

qu'avec pourtant la simple intégration des données démographiques, on reconstitue assez fidèlement le rythme des défrichements et de l'expansion humaine sur ce territoire.

Étape ③: L'analyse de sensibilité (Crosetto et al. 2006) : toute approximation implique une marge d'erreur. Dans notre démarche, et comme dit précédemment, l'erreur peut venir de l'outil de mesure lui-même, de la qualité de l'échantillonnage et du protocole au regard des exigences de validité statistique, de notre propre simplification dans l'intégration de cette série sous forme de règles, etc. L'analyse de sensibilité permet d'estimer le poids d'une variable dans l'ensemble modélisé et par là à la fois d'estimer l'importance que l'erreur sur cette variable pourrait avoir sur la valeur de l'ensemble, et la sensibilité du modèle à cette variable elle-même. Une analyse complète d'un modèle revient à modifier la valeur de un ou deux degrés de liberté au-dessus et en dessous de la valeur moyenne (soit au minimum 5 degrés de liberté) et de regarder l'écart des résultats de simulation avec les résultats d'origine *ceteris paribus*. Cependant, l'approche de modélisation empirique adoptée a pour corollaire qu'il est difficile en pratique d'en estimer la pertinence par une analyse de sensibilité complète. Pour des modèles KIDS comme SIMSHAEL, PASHAMAMA ou PALEOMEX, on envisage un minimum de 50 paramètres. Avec 5 degrés de liberté et un minimum de 20 répétitions, 5000 simulations seraient nécessaires chacune prenant le plus souvent plusieurs heures (Manzo, 2014 ; Rubio-Campillo, 2015). Comme le remarquent Amblard et al. (2006), il est plutôt souhaitable de procéder à des regroupements de variables pour diminuer le nombre de simulations à effectuer. L'idée est alors de faire un échantillonnage raisonné des variables à tester. J'ai utilisé donc une analyse de sensibilité partielle sur les variables à faible distance relative, donc de rang et de poids élevé qui auraient *a priori* un impact significatif sur le devenir du modèle, mais aussi éventuellement impactants selon la littérature et du panel des disciplines scientifiques qu'elles couvrent. 6 variables furent sélectionnées sur 52 dans le modèle SIMSAHEL, chacune fut modifiée dans le modèle (1/3 ; 2/3 ; 3/3 ; 4/3 et 5/3 de la valeur moyenne) et celui-ci lancé 20 fois. Ces variables furent choisies de manière à ce qu'elles appartiennent à trois catégories différentes (biophysique, économique et social) :

- Deux variables biophysiques tirées de la littérature (probabilité de sécheresse et valeur du bétail) ;
- Deux variables liées aux activités de production (coût de la migration et prix des engrais inorganiques) ;
- Deux variables internes à la société villageoise (coût du mariage et tension sur l'héritage foncier).

La signification des résultats est testée par une analyse de variance (ANOVA) à 95% de signification. On pourrait utiliser la méthode de Morris qui hiérarchise les variables selon des classements qualitatifs mais ne peut pas être utilisée comme méthode de sélection (Morris, 1991 ; Ye et Hill, 2017). La Figure 52 montre les résultats de la sensibilité de 3 des 6 paramètres :



Encore une fois, chacune de ces étapes ne peut constituer une validation mais l'ensemble va permettre d'assumer auprès de la communauté scientifique tant de la modélisation que des disciplines associées à tel modèle d'utiliser ce dernier comme banc d'essai ou paillasse pour des usages d'exploration des dynamiques d'un territoire.

5.3 Que faire avec un modèle « validé » ? Rétroprospective, prospective, généricité spatiale, scénarios & alternatives de gestion

5.3.1 Rétroprospective : Explorer et tester

Comme vu précédemment, la rétroprospective est une forme de « validation » par comparaison avec des données extérieures sur la durée et pour le même territoire. Elle peut être également un outil pour rendre compte des effets des concomitances de temps et des accumulations dues au temps : Le premier article décrivant PASHAMAMA sur l'Oriente Amazonien, Houssou et al. (2019) illustre cet aspect (Figure 21) : en reconstituant le rythme des inondations, des contaminations et de la colonisation humaine, nous avons reconstitué non pas l'exact historique des contaminations des zones inondées et donc des champs et des habitants à proximité mais les occurrences et par là l'accumulation moyenne par unité de territoire et par *finca* (exploitation agricole). Nous pouvons dès lors faire tourner ce module le nombre de répétitions requis et obtenir la carte de l'historique des contaminations pétrolières statistiquement le plus probable, et en intégrant l'effet cumulatif de ces petites contaminations sur la santé, la carte de l'effet délétère des contaminations pétrolières sur la santé.

5.3.2 Scénarisations

Un scénario est une modification particulière de valeurs de paramètres pour certaines variables, combinaison élaborée pour induire telle modification de l'ensemble de la simulation ayant un sens thématique et scientifique. Ils sont la manière, constitués en plans d'expérience, d'exploiter le modèle comme une paillasse d'expérimentation, d'explorer ce qui est encore inconnu. Cependant, cette démarche peut avoir plusieurs objectifs différents :

Compléter les trous du modèle

Lorsque ces variations portent sur la situation présente telle qu'observée sur le terrain, mais concernent des variables sur lesquelles on n'a aucune information. Par exemple, une reconstitution des dynamiques d'un territoire comme l'Oyapock ou Ntsiété (Gabon) (Van Vliet et al. 2010) pour lequel on n'aurait que peu d'informations sur les pratiques de chasse pourrait comporter plusieurs modalités, chacune constituant un scénario. Les scénarios sont ainsi une forme de test de l'impact des variations possibles de valeurs incertaines et par là, du poids de l'erreur potentielle dans la valeur du modèle calibré. Ainsi, c'est une forme d'analyse de sensibilité du modèle. Plus encore, la reconstitution spatialisée du territoire peut également permettre d'identifier des zones d'installation et de colonisation particulièrement propices pour le climat et les conditions de l'époque, permettant éventuellement d'identifier ainsi de nouveaux sites archéologiques.

Tester des hypothèses par l'absurde

Cette méthode est l'utilisation la plus formelle des modèles au sens où elle produit le meilleur résultat possible, par réfutation d'hypothèses scientifiques :

- L'infirmité peut concerner directement des hypothèses considérées comme solides : ainsi, sur la base du modèle PALEOMEX, il s'agirait de reconstituer des systèmes d'activité de populations néolithiques en Languedoc-Roussillon, et de tester le scénario moyen où des populations néolithiques dans les conditions agricoles telles qu'envisagées pour l'instant et dans le climat connu sur ce territoire pour le début du néolithique. Certains thématiciens partenaires envisagent un impact de périodes plus froides, plus sèches ou plus chaudes sur les démographies des populations agricoles, expliquant ainsi certains effondrements. Une fois le modèle PALEOMEX « validé », il s'agirait dès lors de tester ce scénario moyen. Mon hypothèse est que, la densité démographique étant alors de moins de 5 hab. /km², la disponibilité en produits de cueillette, de chasse, de pêche, appuyés par les produits de l'élevage, activité également plus robuste que l'agriculture aux variations climatiques, compenserait amplement quelques faibles récoltes ; par conséquent, les variations

climatiques ne pourraient expliquer seules des effondrements démographiques et donc, les facteurs sociopolitiques internes seraient seuls décisifs. Cela reste à tester !

- Je me propose, toujours pour le futur modèle PALEOMEX, d'élargir la démonstration au-delà du scénario précédent qu'on pourrait qualifier de *Business as usual*. il s'agit de faire tourner la même situation mais avec des variations climatiques toujours plus fortes (plus d'évènements secs, sécheresses plus fortes, hivers de plus en plus glacials, etc.), devenant progressivement volontairement caricaturaux, jusqu'à atteindre l'effondrement par le simple jeu des conséquences sur les ressources en nourriture. On obtiendrait ainsi une limite de résistance potentielle de la société néolithique en question à des situations climatiques, qu'on pourra montrer ne pas avoir eu lieu à l'époque considérée, permettant de renforcer le point précédent.

Elaborer une vision du futur par scénarios prospectifs

L'utilisation accrue de l'évaluation prospective, notamment en ce qui concerne les questions agroenvironnementales, permet d'évaluer de manière spatialement explicite l'impact des activités humaines sur un territoire (Paegelow et al. 2004 ; Paegelow & Camacho-Olmedo, 2008). Lorsqu'il s'agit d'explorer le futur, trois démarches sont à envisager :

1. La première étape est la corroboration par approximation du scénario historique passé et sa poursuite *business as usual*, i.e. la poursuite dans le futur de la situation actuelle sans modification structurelle (comme dans une analyse de sensibilité) ni scénarisation (l'introduction à une date t d'une modification des paramètres d'origine). C'est le sens du terme « rétroprospectif », reconstituant le passé, corroborant ainsi le présent pour explorer un des futurs possibles (Paegelow et al. 2004 ; Paegelow & Camacho-Olmedo, 2008) ;
2. L'intérêt de cette exploration du scénario *business as usual* est de voir « jusqu'où ça ira ». Cela n'implique pas nécessairement une trajectoire linéaire, des phénomènes de rupture, d'émergence ou de transition massive et/ou brutale pouvant avoir lieu « spontanément », comme des transitions brutales d'organisations familiales dans le modèle SIMSAHEL. L'exploration du scénario *business as usual* consiste ici à analyser la variabilité du modèle au fil des répétitions, fournissant ainsi des indices de robustesse pour les différents éléments du modèle, comme pour mon exploration de la différence de robustesse des familles élargies et des familles mononucléaires dans SIMSHAEEL ;
3. les scénarios permettent soit d'explorer plusieurs « narrations différentes » dues à des variations de variables extérieures au territoire (par exemple, prix des produits agricoles, trajectoires démographiques, etc.), soit d'explorer des choix politiques, des modes de gestion ou autres dynamiques internes au territoire (Paegelow & Camacho-Olmedo, 2008 ; Verhagen & Whitley, 2012). Les scénarios ne sont pas destinés à prédire, c'est-à-dire à annoncer ce qui **doit** arriver avec un niveau de confiance le plus haut possible comme pour des prévisions météorologiques, mais bien de **proposer** et d'explorer l'éventail des futurs possibles et/ou désirables et sur cette base, d'élaborer une discussion sur la gestion actuelle (Etienne et al. 2003 ; Paegelow et al. 2018). Le but est d'obtenir plusieurs images (contrastées ou non) de ce futur. Dans tous les cas, ces scénarios exploratoires (ou *forecasting*) sont construits avec une modification qui a lieu à un moment au cours de la simulation et on ne sait pas *a priori* ce que cela va entraîner (Paegelow et al. 2018)⁶⁹.

Un outil pratique pour faciliter l'exploration du modèle par les différentes disciplines

Je propose ici, plutôt que des scénarios construits particulièrement selon une série de critères légitimes (voir section précédente) de fournir avec le modèle une interface de modification des paramètres selon une certaine marge de degrés de liberté, à l'instar d'une analyse de sensibilité. Cette démarche, selon le nombre de paramètres identifiés comme inconnus, pertinents à faire bouger « hors des lignes » et le nombre de degrés de liberté envisagé, peut générer un nombre exponentiel de scénarios d'exploration (Figure 53).

⁶⁹ Enfin, il existe une prospective basée sur des scénarios normatifs (ou *backcasting*) à partir desquels on va essayer de reconstituer les conditions nécessaires à leur survie.

		ALLELE 1	ALLELE 2	ALLELE 3	Variations	Combinaisons cumulées
1	Initial Population	500	5000	50000	3	3
2	Colonisation: le choix du site	sur Dubouloz Database	sur fertilité seulement	Sur fertilité & végétation	3	9
3	Colonisation: le processus	F(distance) (Bocquet -Appel)	F(sites) (Saqalli)	F(anthropologie) (Dubouloz)	3	27
4	Mode de culture	Permanent cultivation	Shifting cultivation	/	2	56
5	système de culture	Cultures associées	Cultures pures	/	2	112
6	Livestock system	Avec émondage généralisé	Sans émondage	/	2	224
7	Organisation familiale	Elargie	Mononucléaire	/	2	448
8	Linéarité	Patri	Matri	Equal	3	1344
9	Localité	Patri	Matri	Equal	3	4032
10	Climat	Données Ortu	Artificiellement stable	Autres data (Berger ?)	3	12096
11	Mésolithiques	Présence Aléatoire	Présence comme hameaux	Absence	3	36288
12	Solidarité entraînant une transmission du "collapse" Etc.	No	Oui, via la parenté	Oui, via les oo-villageois	3	108 864

Figure 53. Combinaison de paramètres choisis, proposée pour le modèle OBRESOC, avec ainsi 108 864 scénarios possibles.

Cela peut permettre aux chercheurs partenaires de réaliser l'ampleur de la gamme d'évolutions qu'un SSER ainsi modélisé mais pas encore justifié pour chaque paramètre peut suivre tenu compte des inconnues en cours. C'est ainsi une manière d'élaborer *de facto* un « serious game » (Barreteau, 2003 ; Barreteau et al. 2003 ; Becu et al. 2008 ; Castella, 2009 ; Anderies et al. 2011) servant à la formation et à la facilitation du dialogue entre chercheurs partenaires. J'avais fait cette proposition au cours du projet OBRESOC mais le délitement de l'équipe dirigeante a rendu cette proposition caduque. On pourrait tout à fait l'envisager pour des projets de recherche futurs ou en cours, par exemple au sein de l'équipe PALEOMEX mais aussi auprès des représentants Equatoriens partenaires du projet initial MONOIL et associés et intéressés par le modèle PASHAMAMA.

Elaboration de scénarios et participation

Au-delà de la pertinence des choix de scénarios et leur nombre, les personnes à l'origine de l'élaboration de ces scénarios positionne le modèle dans une démarche plus ou moins participative. Sans revenir sur le positionnement dans l'échelle de la participation (Arnstein, 1969) et l'intérêt des démarches participatives comme par exemple la démarche COMMOD (Etienne, 2010), élaborer un dialogue via la modélisation ou toute autre démarche formelle d'explicitation des divergences d'opinion (Bonaccorsi & Nonjon, 2012; Mayer et al. 2016) semblent nécessiter certaines conditions. Plusieurs points impliquent en pratique une conjonction de conditions favorables pouvant faire que la modélisation ne soit qu'un outil vu comme neutre, d'un point de vue constructiviste, puisque le recours à une institution extérieure ou une convention d'accord apparaît déjà comme acceptée (Ostrom, 1990). De plus, la démarche donne ainsi beaucoup de pouvoir à l'animateur (« *white savior effect* ») et un statut d'arbitre au modèle et à son opérateur sans justifier totalement de sa légitimité. Sans développer plus avant, on peut cependant élaborer sur cette base les conditions de l'implication de divers partenaires dans l'élaboration de ces scénarios. Si les décideurs eux-mêmes sont partie prenantes, alors l'objectif ressemble fortement à de la planification, éventuellement concertée entre acteurs décideurs et entre parties prenantes. Mais la plupart du temps, en pratique, les décideurs véritables ne sont ni parties prenantes ni présents dans une réflexion collective, car c'est une démarche fortement chronophage et potentiellement problématique en termes de perte de pouvoir. Cependant, cet enjeu du pouvoir est non négligeable : il s'agit de construire une légitimité pour la démarche participative elle-même face à d'autres légitimités et pouvoirs (Campo et al. 2010 ; Happe & Balmann, 2008 ; Voinov & Bousquet, 2010).

Cette légitimité peut se vouloir être seulement « d'experts », groupant scientifiques, parties prenantes via la constitution d'un collège débattant ou constituant des scénarios ; Cette légitimité devient représentative au sens de l'obtention d'un consensus entre experts différents sur des résultats, des prévisions, des scénarios ou des propositions de gestion qui lui donne sa légitimité, ce qui suppose de mettre ensemble ces experts, le plus souvent un regroupement de chercheurs et d'acteurs locaux. Nous avons essayé d'aborder la construction de

scénarios avec les partenaires du projet MONOIL à l'origine du modèle PASHAMAMA sur l'Amazonie Equatorienne (Figure 54).



Figure 54. Photos illustrant les réunions de la démarche ARDIQS.

La démarche suivie a différé de l'élaboration d'une série limitée de scénarios de types *forecasting*, mais plutôt partir de la démarche ARDIQ présentée plus haut et poursuivre plus avant la réflexion, en particulier sur la caractérisation des variables qui conditionnent le futur du territoire. À la suite de la démarche ARDIQ présentée précédemment a ainsi été élaborée une grille de variables cruciales dont les variations combinées constitueront toutes autant de scénarios possibles. On obtient ainsi comme résultats une série de groupes de variables (figure 55, où les groupes y sont mal nommés *scénarios*). J'envisage ainsi plutôt que d'utiliser formellement les résultats du modèle pour permettre une négociation entre partie de transformer le modèle comme interface individuelle de prise en compte des points de vue des autres acteurs, à distribuer aux parties prenantes

5.4 En guise de conclusion partielle : Exemple de séquence de modélisation

La séquence des travaux de recherche en Oriente Amazonien, parti du Programme PEPS MONOIL, puis de l'ANR MONOIL, puis des différents programmes GHIVARO et enfin des CDUs et projets MADA et PASHAMAMA s'est déroulé sur 7 ans et doit se poursuivre encore 2 à 3 ans tenu compte des fins de thèses, des écritures d'article et des retards et délais inhérents à ces actions de longue haleine. Avec les délais inhérents aux publications, les articles publiés illustrent la démarche complète de terrain et de modélisation présentée dans cette partie « modéliser ». Plusieurs sont envisagés à la suite des travaux de L. Houssou, J. Durango, R. Méjean et D. Kaced :

- 1) Maestriperi & Saqalli (2016) et Saqalli et al. (2017) présentent une première cartographie, par ZADA du territoire de l'Oriente. Différentes pistes sur son fonctionnement, comme l'importance des routes qui reflète quelque peu les statuts sociaux, le poids des flux démographiques locaux comme de rapports

- | | |
|--|---|
| <p>ESCENARIO 0</p> <ul style="list-style-type: none"> • Que cantidad, frecuencia y medio de contaminantes petroleros? • Que grado la contaminación petrolera hace frente otras contaminaciones? • Que velocidad de transferencia y acumulación de cada contaminante en el tiempo y en el espacio? <ul style="list-style-type: none"> • Impactos de cada contaminación sobre ecosistema: flora, fauna (acuática/terrestre), suelos, aire, agua? • Impactos de cada contaminación sobre la salud: humanos? <p>ESCENARIO 1: información y formación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Efectos de difusión de la información: gente, actores públicos, empresas petroleras? • El nivel de respuesta de las personas respecto a la contaminación? (cultura del riesgo – percepción del bienestar) <p>ESCENARIO 2: apoyo gobierno para mejorar sistemas de seguridad (formación, técnico)</p> <p>ESCENARIO 3: control de contaminaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mas control con la misma legislación <ul style="list-style-type: none"> • 3a/ Sistemas y normas de control • 3b/ Accidentes/factores externos • Cumplimiento de la legislación <ul style="list-style-type: none"> • 3c/ Mas control: impuestos, multas; 3d/ mas apoyo (\$, recursos físicos y humanos) | <p>ESCENARIO 4: nivel de remediación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Remediación ambiental? <ul style="list-style-type: none"> • 4a/ Mas control: impuestos, multas; 4b/ mas apoyo (\$, recursos físicos y humanos) • 4c/ apoyo para mejorar la eficiencia/adaptabilidad de metodologías de remediación • Remediación con impacto a la salud? <ul style="list-style-type: none"> • 4d/ apoyo para la Salud: remediación sistema de agua ante centros poblados • 4e/ apoyo para mejorar la eficiencia/adaptabilidad de metodologías de remediación • 4f/ apoyo para la Salud: mas plata para los centros de salud • Indicador: Vulnerabilidad de la población frente a la contaminación petrolera? <p>ESCENARIO 5: escenarios con cambios externos</p> <ul style="list-style-type: none"> • 5a/ Impacto del cambio climático (precipitaciones)? • 5b/ Impacto del cambio del precio del petróleo • 5c/ Impacto del cambio del precio de otros productos de exportación • 5d/ Impacto del cambio del precio de productos agropecuarios • 5e/ Impacto de los remesas de los migrantes <p>ESCENARIO 6: apoyos del gobierno</p> <ul style="list-style-type: none"> • 6a/ 12% -> 20%: dinero del petróleo • 6b/ Apoyo para otras industrias y otros producciones agrícolas • 6c/ Cambio del centro de decisión |
|--|---|

Figure 55. « Scénarios » ou groupes de variables obtenues par démarche ARDIQS qui, se combinant, seront autant de futurs possibles pour le modèle PASHAMAMA de l'Oriente Amazonien Equatorien

inégaux entre politiques, populations et sociétés pétrolières. Les mêmes missions ont permis de collecter une grande quantité d'informations SIG éparses, dispersée, hétérogènes et incomplètes mais permettant une fois harmonisées de constituer une base de données sur laquelle s'appuyer pour les infrastructures

- humaines en particulier. La poursuite des missions ZADA a permis depuis de multiplier par trois le nombre de cartes ZADA, qu'il reste à valoriser.
- 2) Morin (2015) et formalisé dans Morin & Saqalli (2017) retrace et reconstitue la colonisation du territoire de la paroisse de Dayuma (province d'Orellana, centre-nord de l'Amazonie équatorienne) par entretiens et bibliographie, avec les poids des dynamiques historiques et leur poursuite, atténuée ou amplifiée qu'il est important d'introduire dans le modèle, ici la démographie de la colonisation sur le territoire, comme la typologie des acteurs agricoles selon leurs paramètres socio-économiques ;
 - 3) Béguet (2016) et formalisé dans Saqalli et al. (2020) l'approche anthropologique vient clarifier le mode de croyance et de valeurs appuyant les différentes rationalités identifiées en 2). La confirmation de cette intrication des identités permet d'assumer le progressif dépassement d'une vision essentialiste, ici ethnique différenciant amérindiens et colons après une génération de coexistence certes pas toujours paisible ;
 - 4) Durango et al. (2019) a reconstitué le flux des « derrames » ou accidents pétroliers par généralisation du rythme calculé à partir des données sur quelques blocs pétroliers, et de leurs déversements en incluant les flux d'eau (pluies, ruissellements et écoulement de rivière) produisant ainsi une reconstitution des taux de contamination, ici par SIG pour en voir la répartition actuelle. Pour cela, sont comparés les volumes de derrame simulées (combinant données sur quelques sites bien renseignés et interpolation/généralisation tenu compte des infrastructures et réseaux pétroliers) et résultats de reconstitution selon différentes méthodes de projection (économiques, probabilité) : l'intégration de données spatiales rend plus fine l'estimation des volumes déversés, rendant crédibles les estimations de cette pollution très médiatique mais où tous les chiffres s'affrontent. Ce travail est poursuivi dans les autres articles de Durango-Cordero et al. (2018 ; 2019 et soumis)
 - 5) Houssou (2016) et Chapotat (2016) formalisés dans Houssou et al. (2019) : La construction du modèle Multi-Agent combine une construction biophysique du climat et des flux d'eau et des réseaux hydriques, par lesquels passent les contaminations pétrolières lors des inondations locales, et la reconstitution des logiques d'installation agricoles et la déforestation induite. Il intègre, pour la déforestation, une confrontation entre données simulées par le modèle multiagent d'une part et données de télédétection d'autre part grâce à Juan Durango. Avec la simple intégration des données démographiques, du réseau pétrolier et les probabilités d'accident, on reconstitue le rythme des défrichements et de l'expansion humaine sur ce territoire. On arrive alors à une reconstitution de l'exposition et de la vulnérabilité d'une population au risque pétrolier chronique au cours des 3 dernières décennies, mais construit à partir de dynamiques simples exposées dans les étapes précédentes, la colonisation d'une part, l'aléa pétrolier d'autre part ;
 - 6) Kaced et al. (2019) : L'intégration d'un module agricole permet d'affiner la dynamique de colonisation mais aussi d'acquisition des revenus des différentes populations installées dans le modèle présenté en 5). Cela permet d'introduire la différenciation :
 - a. dans l'espace entre populations, proches de la route ou loin de la route, avec tous les enjeux d'inaccessibilité relative (plus de temps pour venir à la route donc moins de marge bénéficiaire) ou absolue (pas de ponts ou pas de route) ;
 - b. dans le temps : l'impact des variations de prix agricoles a joué un rôle majeur dans les revenus de la population mais aussi dans les vitesses de défrichement forestier. En effet, les prix de l'élevage ont surpassé ceux du café et du cacao, la défriche plus importante induite par l'élevage a entraîné un plus grand défrichement par exploitation agricole, seulement compensé par un abandon important des exploitations ou leur orientation vers le vivrier pour les exploitations loin de la route ;
 - 7) Méjean et al. (2019 ; 2020): l'initialisation du modèle a été affinée en utilisant les données des recensements équatoriens, la distribution spatiale de la population colonisant ce territoire est justifiée; on obtient alors une bien meilleure correspondance entre usage du territoire décrit localement, imagerie satellitaire et modélisation par automate cellulaire telle que le fait notre modèle multiagent PASHAMAMA, précision atteinte jusqu'à la correspondance entre taille des familles et niveau de mise en culture des fincas familiales. L'application d'un générateur de population à la population des parcelles agricoles permet d'attribuer spatialement la distribution des productions agricoles selon les logiques agricoles familiales et le positionnement sur le territoire ;
 - 8) Kaced et al. (en cours d'écriture) : c'est ici introduire l'accès et les échanges d'information dans les choix des agriculteurs par le lien avec les ZADAs. En reliant la « vision du monde » de chaque agent agriculteur

non plus aux données « réelles » définissant le territoire simulé mais aux cartes issues des ZADAs, on redéfinit sa vision du territoire et donc son comportement ; on espère ainsi faire tourner un modèle où les agents voient leur rationalité conditionner par leurs croyances, elles-mêmes définies par leurs caractéristiques sociales mais où l'expérience acquise progressivement par ces mêmes agents modifie progressivement leur représentation du monde.

Ainsi, cette démarche, certes non achevée⁷⁰, illustre notre objectif d'utiliser le modèle comme une plate-forme modulaire pour formaliser l'intégration et l'échange d'informations, de règles et de données issues de différentes disciplines scientifiques, chacune altérée au profit de l'objet de recherche commun. C'est ainsi qu'au-delà des appels et mantras répétitifs, je souhaite mettre en forme une interdisciplinarité effective et empirique en pratique, objectif que je souhaite développer dans le futur et que je présente dans la partie suivante.

Belem M., Olaniyi A. O., Barbier B., **Saqalli M.**, H. K. Mandé, Sawadogo P. Projection of West-African Cropland Dynamics under socioeconomic and climate Scenarios. *Futures*. (soumis)

Saqalli, M., Cahierre M., Peyron O., Azuara J., Combourieu-Nebout N., Sicre M.-A., Lespez L. 2020. Classification of ligneous vegetation into Plant Functional Types for a dynamic reconstitution of Neolithic vegetation cover in Occitania Mediterranean seashores. EGU General Assembly 2020. EGU2020-5212

Houssou N. L. J., Durango-Cordero J., Bouadjio-Boulic A., Morin L., Maestriperi N., Ferrant S., Belem M., Peláez J. I., Saenz M., Lerigoleur E., Elger A., Gaudou B., Maurice L., **Saqalli M.** 2019. Synchronizing histories of exposure and demography: the construction of an agent-based model of the Ecuadorian Amazon colonization and exposure to oil pollution hazards. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22, 2, 1 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/22/2/1.html>

Vander Linden M., **Saqalli M.** 2019. Introducing qualitative and social science factors in archaeological modelling: necessity and relevance. In: *Integrating qualitative and social science factors in archaeological modelling*. Springer Simulating the Past books Series. Springer Editions, New York, USA.

Saqalli M., Saenz M., Belem M., Lespez L., Thiriot S. 2019. *O tempora O mores*: Building an epistemological procedure for modeling the socio-anthropological factors of rural Neolithic socio-ecological systems: Stakes, choices, hypotheses and constraints. In: *Integrating qualitative and social science factors in archaeological modelling*. Springer Simulating the Past books Series. Springer Editions, New York, USA.

Méjean R., Paegelow M., **Saqalli M.**, Kaced D. 2019. Business-as-Usual scenarios in land change modelling by extending calibration period & integrating demographic data. *Geospatial tech. for local & reg. dev.*, 243-260. Springer, Cham.

Méjean R., Paegelow M., **Saqalli M.**, Kaced D. 2019. Improving Business-as-Usual Scenarios in Land Change Modelling by Extending the Calibration Period and Integrating Demographic Data, 22nd Conference on geo-information sciences, Limassol, Cyprus, 2019/06/17-20. <https://agile-online.org/>

Paegelow M., Maestriperi N., **Saqalli M.** 2018. La prospective territoriale : de la modélisation spatio-temporelle aux scénarii futurs. In : *Systèmes Complexes : de la Biologie au territoire*. Les dossiers d'Agropolis International.

Saqalli M., Belem M., Gaudou B., Saenz M. Paegelow M., Maestriperi N. 2018. Modéliser les sociétés et leurs territoires : de l'importance des sciences sociales. In : *Systèmes Complexes : de la Biologie au territoire*. Les dossiers d'Agropolis International.

Kaced D., Méjean R., Richa A., Gaudou B., **Saqalli M.** 2018. PASHAMAMA: An agricultural process-driven agent-based model of the Ecuadorian Amazon. MABS 2018: 19th International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation. Stockholm, Sweden. <http://iotap.mau.se/mabs2018/>

Belem M., Olaniyi A. O., **Saqalli M.**, Barbier B., Mande H. K., Tondoh J. E. 2018. Prediction of West African Cropland Dynamics under Climate Scenarios. IEEE – 1st International Conference on Smart Cities and Communities, 24-26 July 2018, Ouagadougou, Burkina Faso.

Belem M., **Saqalli M.** 2017. Development of an integrated generic model for multi-scale assessment of the impacts of agro-ecosystems on major ecosystem services in West Africa. *Journal of Environmental Management*. 202, 1, 117–125.

Belem M., **Saqalli M.** 2017. Development of an integrated generic model for multi-scale assessment of the impacts of agro-ecosystems on major ecosystem services in West Africa. WCNRM2017 Conference "Vulnerability and Resilience of Socio-ecological Systems" Barcelona, España. https://issuu.com/paucostafoundation/docs/booklet-2-fundacio_web

Saqalli M., Ali Moussa T., Peyron O., Sabatier P., Combourieu-Nebout N., Dezileau L., Bassetti M.-A., Vannièrre B., Sicre M.-A., Carozza L., Carozza J.-M., Lespez L. 2017. Land, rain and sweat: Building a database of what we need for building a temporally dynamic and a spatially explicit agent-based model of Neolithic occupation in Languedoc-Roussillon. Conférence MISTRALS PAELOMEX 16-18/10/2017, Montpellier, France.

Lespez L., Bassetti M.-A., Berger J.-F., Carozza J.-M., Carozza L., Combourieu-Nebout N., Dezileau L., Glais A., Ghilardi M., Kuzucuoglu C., Peyron O., Sabatier P., **Saqalli M.**, Vannièrre B., Sicre M.-A., Jalali B. & Paleomex team. 2017. *Climate Change*

⁷⁰ Car n'intégrant pas encore les règles d'évolution familiale telle qu'observée sur le terrain (divorce, héritage), les effets à long terme des ré-enfrichements et des abandons de terres du fait de fertilités des sols altérés ou des pollutions, et enfin les scénarios d'exploration du futur tels que décrits dans la section ARDIQS.

and social transformations in the past (12ka BP): from field data acquisition towards socio-ecological modeling. Conférence MISTRALS PAELOMEX 16-18/10/2017, Montpellier, France

Chapotat W., Houssou L. J. N., **Saqalli M.**, Gaudou B., Lerigoleur E., Maestripiéri N., Bouadji-Boulic A. 2016. An agent-based model of the Amazonian forest colonization and oil exploitation: The Oriente study case. IEMS Conference Toulouse.

Belem M., Maestripiéri N., Sáenz M., **Saqalli M.** 2015. Integrated assessment modelling of environmental impacts of land use policy in West Africa: A conceptual model. Conférence SAGEO, Hammamet, Tunisie, 11/2015.

Saqalli M. 2015. Simple is beautiful? Building a simple climate model for modelling archaeological issues. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère 01/2015, Toulouse, France

Saqalli M. Salavert A., Bréhard S., Bendrey R., Vigne J.-D., Tresset A. 2014. Revisiting and modelling the woodland farming system of the early Neolithic Linear Pottery Culture (LBK), 5600–4900 B.C. *Veg. Hist. & Archaeobot.* 23, 1: 37-50.

Saqalli M., Kaplan J.O., Baum T., Lemmen C. 2014. Reconstituting human past dynamics over a landscape: pleading for the co-integration of both microvillage-level modelling and macro-level ecological socio-modelling. SSC'14 Social Simulation Conference European. SPUHH: Simulating the Past to Understand Human History, Barcelona, Spain, 04/09/2014.

Saqalli M., Bièlders C. L., Defourny P., Gérard B. 2013. Reconstituting family transitions of Sahelian western Niger 1950-2000: an agent-based modelling approach in a low data context, *Cybergeo: European Journal of Geography* 634.

Saqalli M. 2013. Modelling the past farming systems: implied methodologies and issues. Modeling the Past – Predictive Approaches to Climate, Environment, Population & cultural Dynamics in Prehistory Workshop Berlin, Allemagne 11/2013.

Bocquet-Appel J.-P., **Saqalli M.**, Dubouloz J., Berger J.-F., Vigne J.-D., Tresset A., Schwartz D., Salavert A., Ertlen D., Gauvry Y., Ortu E., Sanchez Goñi M.-F., Finsinger W., Dormoy I., Demoule J.-P., Carcaillet C., O'Connor M. 2012. Multi-agent simulations of the trajectory of the LBK Neolithic. Conf. Early Farmers: the view from Archaeology and Science, Uty of Cardiff, UK, 05/2012.

Saqalli M., Salavert A., Bréhard S., Bendrey R., Dubouloz J., Bocquet-Appel J.-P., Vigne J.-D., Tresset A. 2012. Contribution of archaeozoology and archaeobotany to a multi-agent system mimicking the LBK society (Central Europe, 6th-5th millennia BC). Conf. Early Farmers: the view from Archaeology & Science, Uty of Cardiff, UK, 05/2012.

Saqalli M., Salavert A., Ertlen D., Moussa R., Bocquet-Appel J.-P. 2012. Modeling a typical LBK hamlet functioning at the household level. 3rd International Schöntal Conference Farming in the Forest Ecology & Economy of Fire in Prehistoric Agriculture, Klöster Schöntal, Allemagne 07/2012.

Saqalli M. 2012. Sociétés rurales : Paradigmes associés et Approches par la Modélisation multi-agents. Observatoire Hommes-Milieux Tessékéré CNRS UCAD, 27/08/2012 Widou-Thiengoli, Sénégal.

Neumann M., Braun A., Heinke E.-M., **Saqalli M.**, Srbljinovic A., Wijermans N. 2011. Challenges in modeling social conflicts: Grappling with polysemy. *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*, 40, 1.

Saqalli M., Gérard B., Bièlders C.L., Defourny P. 2011. Targeting rural development interventions: Empirical agent-based modeling in Nigerien villages. *Agricultural Systems*, 104, 4, 354-364.

Van Vliet N., Milner-Gulland E.J., Bousquet F., **Saqalli M.**, Nasi R. 2010. Effect of Small-Scale Heterogeneity of Prey and Hunter Distributions on the Sustainability of Bushmeat Hunting. *Conservation Biology*, 24, 5, 1327-1337.

Saqalli M., Gérard B., Bièlders C.L., Defourny P. 2010. Testing social-driven family forces on the evolution of Niger Sahelian rural farming systems: A combined agent-based modelling & anthropological approach. *Ecol. Mod.*, 221, 2714-2727.

Saqalli M., Gérard B., Bièlders C.L., Defourny, P. 2010. Simulating rural environmentally and socio-economically constrained multi-activity and multi-decision societies in a low-data context: a challenge through empirical agent-based modeling. *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*, 13, 2.

Saqalli M., Thiriote, S., Amblard, F. 2010. Investigating social conflicts linked to water resources through agent-based modelling. *NATO Science for Peace & Security Series*, 75, 142-157.

Bocquet-Appel J.P. **Saqalli M.** 2010. Modélisation multi-agents d'une société archéologique des premiers agriculteurs européens Décembre 2010. Journées Scientifiques de la Section des SVT de l'EPHE, Paris France

Saqalli M. 2010. Uncertainty in assessing & modelling social changes in rural areas. Novembre 2010. 3ème ESSA Special Interest group on Social conflicts. Aix-la-Chapelle, Allemagne.

Saqalli M. 2010. Variables, methods & data for agro-ecological & socioeconomic integration. Novembre 2010. "ICRAF Global Futures project workshop: Enhancing modelling capability and empirical data to assess the economic impacts of agroforestry and other natural resource management interventions", Nairobi, Kenya.

Van Vliet, N., Nasi, R. Bousquet, F. **Saqalli M.**, Milner-Gulland E.J. 2009. Where and when we hunt counts more than how much we hunt : A case study on bay duikers in Northeast Gabon using a multi-agent system. September 2009. 6th Conference ESSA, Guilford, U. K.

Saqalli M. 2009. Testing social-driven forces on the evolution of Niger Sahelian rural farming socio-systems: A combined agent-based modelling and anthropological approach. September 2009. 6th Conference ESSA, Guilford, U. K.

Saqalli M., Thiriote S., Amblard, F. 2009. Water-related social conflicts: an analysis through agent-based modelling. 11/12/2009. Complex societal dynamics: Security challenges & Opportunities, NATO ARW Zagreb, Croatie.

Saqalli M., Gérard B., Defourny P., Bièlders Charles L. 2009. Une approche multi-agent combinant modélisation sociale et enquêtes anthropologiques pour l'analyse de l'impact de forces sociales sur les évolutions de populations rurales au Sahel nigérien. 3ème Conférence AMMA, Juillet 2009, Ouagadougou, Burkina Faso. biblio.amma-international.org/

Saqalli M., Gérard B., Bièlders C., Defourny P. 2008. Marketing humanitarian support: Empirical agent-based modeling of development actions in Nigérien villages. 5ème Conférence ESSA. Septembre 2008. Brescia, Italie.

Saqalli M. 2006. Multi acteurs, multi activités : Simulations multi agents pour la détection des changements dans l'Organisation sociale dans les villages de l'ouest nigérien. 6ème MOSIM'06. Avril 2006, Rabat, Maroc.

6 Perspectives de recherche

6.1 Bilan et propositions

Mes travaux de recherche peuvent apparaître à première vue comme éclatés en thématiques disparates et peu reliées entre elles. Elles correspondent cependant à un ensemble d'actions qui, toutes, renvoient au souci d'intégrer ensemble le social et le biophysique, et en particulier les informations concernant les contraintes, les relations intrafamiliales et extra-familiales, les rationalités et adaptations des habitats des territoires ruraux, en parallèle des dynamiques écologiques, des évolutions des sols et des eaux. Ceci afin de mieux comprendre, formaliser et quantifier les dynamiques démographiques, territoriales et environnementales d'un système socio-écologique rural.

A travers la présentation de mes travaux de recherche, je me suis attaché à montrer que la prise en compte de ces dimensions comme un ensemble cohérent dans une démarche de reconstitution de l'histoire et du fonctionnement d'un SSER, quelle que soit son époque et son biome, permettait de mettre en regard les différentes forces concernées. C'est ainsi une manière de dépasser, au moins partiellement, l'obstacle épistémologique de la difficulté différentielle de l'accès aux données et aux informations.

D'un point de vue thématique, les trois « sociobiomes » que j'ai présentés dans ce manuscrit sont des espaces de conquête, initialement « à la limite » de l'œkoumène humain global du moment : les milieux tempérés océaniques et semi-continentaux, comme l'Europe, furent après les milieux méditerranéens et subtropicaux secs les suivants à être colonisés. Les mondes sahéliens et amazoniens sont des espaces de reconquête mais cette fois à des rythmes bien plus rapides que leur première colonisation. Dans les trois cas, la vitesse de transformation est radicalement différente de ce qui se passait auparavant et si ces écosystèmes ne sont pas à la base plus « sensibles » que d'autres, leur transformation radicale ainsi reconstituée rend compte à la fois de la puissance des facteurs socio-anthropologiques et de la plasticité des trajectoires possibles.

L'intérêt et la généricité de l'approche MASSE, y compris le ZADA, construite progressivement au cours des années passées, se devait d'être confrontée au réel, ou plutôt aux réels historiques et géographiques. Les résultats obtenus sur ces trois sociobiomes (les néolithiques européens, les Amazonies contemporaines et les Sahels contemporains) sont toujours en construction mais n'ont pas réfuté la méthode proposée. Elle pourrait cependant être envisagée sur d'autres types de milieux, en particulier qui ont été anthropisés de manière permanente sur de longues périodes : on pense à la Méditerranée ou aux grands Deltas asiatiques comme le Delta du Mékong (même si celui-ci a connu des creux démographiques très notables également). Il s'agirait cependant de rester prudent : nous avons vu combien cette approche était chronophage et complexe. Multiplier les biomes doit donc être évalué également, y compris la solidité et la pérennité des partenariats institutionnels (LabEx ; OHMs, programmes AFD, ANR et/ou ERC) pour accompagner ces recherches, pour soi, pour mes collègues et pour les Master et doctorants qui pourraient ainsi y être encadrés et soutenus.

En termes méthodologiques, cette démarche de recherche, des enquêtes sociales et spatiales de terrain au modèle multiagent spatialisé, permet la formalisation et l'intégration du social dans une reconstitution spatialisée, « environnementalisée » et « temporalisée ». Cela implique non pas un déterminisme mais un conditionnalisme environnemental sur les trajectoires humaines et rend compte à la fois des dynamiques quantifiées et des impacts des actions anthropiques sur l'environnement mais aussi sur la société elle-même, la dimension spatiale n'étant qu'un des vecteurs d'interactions dans cet ensemble.

Les modèles comme les ZADA sont bien évidemment centraux dans la démarche mais ne sont ni l'un ni l'autre une panacée car ils ne sont que la traduction la plus honnête possible des représentations mentales des acteurs de terrain et des acteurs de la recherche, mis ensuite en correspondance. C'est dans la rigueur du qualitatif, pour reprendre l'expression d'Olivier de Sardan (2008), formalisée ensuite de manière quantitative que réside l'intérêt de cette approche. Si cette combinaison d'outils peut révéler l'éventail des trajectoires des SSER et ainsi explorer, de manière rétrospective ou prospective, des trajectoires locales, elle reste fondamentalement une approximation du monde, ce qui doit rester à l'esprit des concepteurs, des formalisateurs et des usagers. Garneau & Delisle (2002) comme Bousquet & Le Page (2004) assignent trois objectifs à la modélisation : Décrire, Comprendre, Prédire. Certes, une bonne description d'une situation (par un modèle, une conceptualisation, une

carte) passe par une compréhension initiale de la situation. La prédiction ne peut également s'envisager que comme le suivi d'une bonne compréhension également. Ces trois objectifs, s'ils ne sont absolument pas interchangeables, pourraient alors être considérés comme les trois étapes successives d'un processus de diagnostic.

De nombreux fronts de recherches restent à explorer pour améliorer cette démarche générale. Comme des modules emboîtés agissant favorablement les uns sur les autres en augmentant l'exigence de qualité de chacun, ces recherches menées de front visent à consolider la robustesse de cette démarche méthodologique volontairement globale. Plusieurs pistes de recherche sont d'ores et déjà identifiées, initiées voire partiellement explorées, avec l'idée qu'elles seront autant de jalons d'amélioration des différentes étapes de la démarche. Je me représente ces recherches comme autant de pointes lancées soit thématiquement soit méthodologiquement :

1. **Les questionnements méthodologiques** sur l'interaction des modèles multi-agents avec d'autres **outils de terrain**, comme le ZADA, **d'adaptation des données** de terrain comme les PFTs, les climats simplifiés ou les bassins versants, et **de modélisation** ;
2. **Les questionnements géographiques**, qui sont des idées exploratoires issues des modélisations : en amont par le projet d'une **cartographie de la main d'œuvre rurale** et de sa productivité à l'échelle mondiale, rendant compte des disparités géographiques colossales existantes, en aval par le test d'un modèle de pensée sur la désertification de type **diffusion-puis-accrétion**.
3. **Les questionnements socio-anthropologiques**, en particulier par l'évaluation de la **plasticité humaine**, à différentes mailles, face aux risques de collapse divers : peuples Néolithiques, groupes amazoniens, familles sahéliennes) mais aussi la construction des **indicateurs sociaux de la désertification** et une étude **systématique de la robustesse des types de famille** possibles face à des chocs socio-environnementaux ;
4. **Les hypothèses thématiques locales** à tester, à savoir les familles et les **jeunes au Sahel**, entre migration, radicalisation et insertion familiale ; la marmite à chicha, ou le possible **melting-pot amazonien** et enfin l'hypothèse « **familles élargies rubanées** ».

6.2 Les questionnements méthodologiques sur l'interaction des modèles multi-agents

6.2.1 Avec les informations qualitatives

La thèse de Doryan Kaced combine plusieurs regards autour de l'intégration des corpus de descriptions qualitatives ou quantitatives issues des ZADAs, l'automatisation de leur combinaison pour créer une carte finale ayant gardé la richesse sémantique d'origine. Cette automatisation de combinaison de corpus sémantiques qualitatifs enrichira les ZADA car ils permettront en pratique de combiner des ZADAs en nombre, au-delà de la limite humaine de la centaine actuelle. D'autre part, cette recherche permettra d'envisager de poursuivre un autre pan de la thèse de Doryan Kaced, à savoir l'implémentation des cartes comme composantes des croyances des agents dans des modélisations multi-agents, pour des rationalités Belief-Desire-Intentions qui seraient ainsi facilitées dans leur représentation du spatial, dans la possibilité d'apprentissages ou d'échanges d'expérience entre agents et dans la reconstitution d'asymétrie d'accès à l'information pour des raisons sociales, économiques ou anthropologiques.

6.2.2 Avec les modélisations quantitatives

Il s'agit de poursuivre ici les réflexions qui sont à l'origine de la thèse de Romain Méjean sur les limites pratiques de plausibilité de la prospective, entre modèles process-based et modèles pattern-based. Nous avons toujours supposé avec Martin Paegelow que les modèles pattern reproduiraient mieux le réel dans un intervalle rapproché que les modèles process, dont les modèles multi-agent spatialisés, par leur adéquation au réel. Au-delà de ce seuil de temps, à plus long terme donc, nous faisons l'hypothèse que les modèles multi-agents prendraient le pas, non pas par leur précision mais par leur exactitude, i.e. ils permettent de couvrir une plus grande divergence de trajectoires, y compris par des émergences brutales. Si le doctorat de Romain Méjean a bien « débroussaillé » le sujet, les perspectives de recherche sont encore nombreuses, en privilégiant cette fois une exploration plus théorique et fondamentale (Bousquet & Gautier, 1999) qu'appliquée (Castella & Verburg, 2007) afin de clarifier cette notion de seuils temporels de validité.

6.3 Les projets de questionnements socio-anthropologiques

6.3.1 Caractérisation des risques, chocs et vulnérabilités des ressources et plasticité humaine

Les trois grands « sociobiomes » étudiés indiquent combien l'espèce humaine est plastique et adaptable : Les cultures néolithiques, une fois replacées dans leur contexte environnemental et vu la faible densité démographique, résistent aux « accidents » environnementaux. Les groupes ethniques amazoniens se réinventent : Teko et Wayãpi, de langues proches ont pourtant une histoire séparée mais se rapprochent. Les peuples de l'Amazonie Equatorienne se métissent. Les familles sahéliennes se reconfigurent pour encaisser et tamponner les conséquences d'abord des crises arides puis de la progressive diminution de la disponibilité des ressources naturelles par habitant, les trajectoires individuelles s'individualisent. Mais on peut émettre l'intuition que chacune de ces adaptations porte une ou plusieurs limites. Il s'agit de poursuivre le développement des modèles déjà existants et les pousser jusqu'à ces limites, de densité, de disponibilité des ressources, de variabilité, au-delà desquelles pas toute la population mais la partie la plus vulnérable sera fortement contrainte. J'avais déjà proposé une formalisation d'une discrimination de la population face aux risques environnementaux dans Becerra et al. (2013) et cette piste de recherche permettrait de rendre compte de ce qu'est effectivement une crise environnementale rurale, entre catastrophisme et négligence. Il s'agit ainsi de caractériser et de catégoriser les vulnérabilités différentielles entre diminution moyenne, instabilité temporelle, variabilité spatiale ou conditionnalité liée à la richesse de l'accès à des ressources critiques.

6.3.2 Systématique des types de famille face aux chocs et aux vulnérabilités

Dans la suite de la proposition précédente, je souhaiterais formaliser la traduction multi-agents des différents types de famille tels que décrits par l'anthropologie structurale (Lévi-Strauss, 1958) : Organisation familiale, localité et linéarité, héritage, hiérarchie intrafamiliale de genre et de rang, etc. En effet, en pratique, cette traduction est d'abord une différence de règles dans un fonctionnement des familles qui se rend visible dans sa structure : la famille élargie diffère de la famille mononucléaire par le fait que le fils (ou la fille) ne quitte pas le domicile parental au mariage. On obtiendrait ainsi une catégorisation des familles qui inclurait mais également préciserait les classifications des systèmes familiaux d'E. Todd, eux-mêmes développements de ceux de F. Le Play (Todd, 2011). Lévi-Strauss considérait que les modèles qu'il mettait à jour avaient peu de chance de se réaliser sous la forme de mariages effectifs, notamment à cause des contraintes démographiques, mais il pensait que ces modèles étaient omniprésents bien qu'inconscients dans la pensée des acteurs. Et Edmund Leach (1989) allait encore plus loin : pour lui, ces belles structures étaient une façon de parler de systèmes bien trop complexes pour être décrits exhaustivement structurellement, mais pas forcément en termes de règles, ce qui est justement le propre de la modélisation agents. Ce travail, somme toute peu complexe en termes de modélisation contrairement aux apparences, sera enrichi par la notion de discrimination différentielle, en plaçant un curseur plus nuancé dans les descriptions de dominations quelque peu tranchées de ces deux auteurs. La typologie des risques et vulnérabilités, décrite ci-dessus, pourrait ensuite être « infligée » à ces différentes familles dans un modèle, permettant de répondre de manière plus catégorique à la question des vulnérabilités différentielles familiales : tout le monde n'est pas affecté par une catastrophe ou un effondrement mais en pratique, qui ?

6.3.3 Indicateurs sociaux de la désertification

Cette proposition renvoie à ma première découverte des milieux sahéliens, nord et sud, au sein du programme ROSELT, dirigé alors par J.-M. d'Herbès et M. Loireau-Delabre, pour lequel je devais faire une comparaison entre observatoires marocains et nigériens de la désertification (Saqalli, 2002). J'avais noté que cette dernière était définie uniquement physiquement, i.e. géomorphologiquement et climatiquement, par divers indicateurs, sans qu'il soit proposé l'équivalent en termes socio-économiques. Or, certains éléments, non absolus mais en termes de tendances, pourraient être envisagés pour une évaluation des évolutions des sociétés rurales, par exemple liés à la dépendance des revenus familiaux vis-à-vis des activités qui n'interagissent pas directement avec le milieu : revenus issus de l'émigration, "placements" en troupeaux éloignés, commerce de produits non issus du territoire, et ce, pour différentes populations (transhumants, sédentaires, agriculteurs, éleveurs). Ce projet envisage également de considérer les accessibilités différentielles effectives par habitant et pour chaque type d'habitants et de familles (voir ci-dessus) aux ressources locales jouant le rôle de tampon pour des populations présentes de manière permanente ou saisonnière. Référencés géographiquement et à intervalles réguliers de

quelques années, ce travail permettrait de rendre compte des vulnérabilités tendancielle et différentielle sur un territoire.

6.4 Les projets de questionnements géographiques

6.4.1 Le modèle diffusion-accrétion

La notion de ressources accessibles met en lumière les points de comparaison possible entre des terrains pourtant aussi dissemblables que l'Amazonie et le Sahel : en Forêt Equatoriale, la difficulté d'accès est telle que, toute ressource n'est utilisable que si elle est accessible. Chasser en dehors des pistes est complexe, tant en Amazonie qu'au Gabon (Van Vliet et al. 2010). Dès lors, les populations se concentrent autour des voies de communication (rivières et routes). Dans l'espace accessible par ces voies, la pression sur les ressources s'exerce en auréoles de pression. De même, la différence d'usages entre désert et Sahel tient à la disposition des ressources : le premier a des « ressources » concentrées quand le deuxième est au contraire diffus. Ces relations, somme toutes triviales, pourraient être formalisées selon un modèle de diffusion et d'accrétion humaines, selon la disponibilité et la dispersion des ressources, indicateur précoce de tendances à l'expansion ou à la contraction de populations sur un territoire.

6.4.2 Cartographie de la main d'œuvre rurale

Cette idée est issue de la rédaction de ce manuscrit : Mazoyer & Roudart (1997) avait montré l'écart manifeste de productivité du travail en agriculture (1 pour 3000 voire plus) en premier lieu du fait du recours massif aux hydrocarbures. Cartographier cette productivité et cette densité de la main d'œuvre rurale rendrait compte de l'impact géostratégique de cette dichotomie de productivité. Une reconstitution historique montrerait les évolutions et se substituerait certes aux dépenses d'hydrocarbures par habitant. Enfin, une échelle fine montrerait les écarts entre régions et localités, et en particulier entre le périurbain et le rural plutôt que seulement entre pays. Je fais l'hypothèse que la vraie frontière de productivité de la main d'œuvre est infranationale et qu'elle est un élément crucial de différenciation entre aires développées et de développement.

6.5 Hypothèses locales à tester

6.5.1 L'hypothèse de l'héritage coutumier comme facteur d'émigration, de rupture voire de radicalisation des jeunes au Sahel

Présentée dans l'article soumis à la revue *Espaces, Populations, Sociétés* pour un numéro spécial dynamiques familiales, cette hypothèse relie le fait trivial que, pour des familles mononucléaires avec 7 à 8 enfants à héritage coutumier, il y a forcément des cadets privés de terres (2.5 sur 3.5). Or, si les espaces haoussa nigériens et nigériens ont adopté le mode d'héritage musulman local⁷¹, créant de facto un tampon apaisant sur les revendications des cadets mâles, cette transition semble ne pas s'être réalisée du côté Kanouri. Je suppose que cela n'a pas eu lieu pour des raisons de densité démographique. Ce processus expliquerait en grande partie le « vivier » de jeunes hommes qu'a pu recruter les différents groupes appelés Boko Haram en particulier côté Kanouri. Cette hypothèse reste à évaluer et l'article présente une proposition de protocole de recherche, passant par un examen par télédétection des évolutions sur une ou deux générations de l'usage des sols comme reflets des statuts fonciers et par là des modes d'héritage. Cette démarche à la limite de la science politique permettrait d'éviter un essentialisme culturaliste et évolutionniste, quand ce n'est pas pire, trop rapidement « dégainé », et un catastrophisme vendeur et « de bon aloi » mais à cantonner aux éditorialistes.

6.5.2 L'hypothèse du creuset des identités amazonien

Dans l'article « Somos Amazonía » (Saqalli et al. 2020), nous faisons l'hypothèse que face au cantonnement folklorisant des populations locales dans l'accès aux pouvoirs publics, au probable abandon de l'état équatorien

⁷¹ Le mode d'héritage musulman officiel accorde 1/3 des biens aux filles et 2/3 aux garçons. Comme présenté par Germaine Tillon (Tillon 1966), dès lors que les biens sont immeubles, les filles sont systématiquement exclues vu la patrilinéarité exclusive sur ce type de biens, que ce soit au Maghreb ou au Sahel.

sur ce territoire amazonien mais aussi aux différenciations foncières entre amérindiens amazoniens d'une part, amérindiens non amazoniens et colons d'autre part, s'élaborera le besoin d'un rapprochement d'abord juridique puis politique, illustré par l'expression « Somos Amazonía » portée par des leaders locaux de tous bords. Cette hypothèse du creuset reste fragile et semble tenir localement dans la limite où les pressions extérieures semblent tenues à distance. L'Etat Equatorien se maintient assez faiblement pour ne pas imposer des pouvoirs extérieurs (pétroliers, agro-industries) et assez fortement pour maintenir une certaine stabilité et une certaine protection. Les prix des produits miniers et agricoles ne sont pas assez élevés pour enclencher une ruée vers ces territoires⁷², essoufflement démographique des populations alentour⁷³. Facilité par une démographie locale supérieure (4 enfants par femme à Camopi, Guyane française) et par de nombreux efforts de structuration politique inter-amazonienne mais desservi par une détresse identitaire bien présente, en particulier pour les jeunes générations, cette hypothèse du creuset reste à démontrer sur ces deux terrains, mais aussi sur des terrains équivalents, dans d'autres pays amazoniens (Brésil, Pérou, Surinam, etc.).

6.5.3 L'hypothèse « familles élargies » comme explication des rubanés

J'ai proposé lors de la World Archaeological Conference 2020 (même virtualisée) dans Saqalli et al. (2020) l'hypothèse d'une structure familiale communautaire élargie pour la culture rubanée comme explication aux maisons longues, à la meilleure capacité de colonisation par rapport aux cultures initialement voisines comme la culture de Starčevo (Dubouloz, 2008 ; Rowley-Conwy, 2011 ; Kreuz et al. 2020 ; Bánffy & Höhler-Brockmann, 2020) et l'effondrement soudain 800 ans plus tard. En effet, cette maison longue rubanée est la caractéristique sociologique la plus évidente et la différence d'avec les autres sociétés néolithiques de l'époque et voisines. Je propose en suivant en cela mon expérience nigérienne que chacune des partitions de ces maisons longues correspond à un ménage mononucléaire, tous liés par des liens familiaux : les rubanés seraient ainsi à l'origine de la famille communautaire élargie en Europe, seule parmi les cultures essentiellement mononucléaires. Les familles élargies nigériennes avaient montré une plus grande capacité en termes de force de travail et de capacité de colonisation et de défrichement des terres mais aussi une moindre robustesse face aux chocs environnementaux. Sans disparaître pour autant, ces grandes familles s'effondrent plus facilement et vue la disponibilité en ressources hors agriculture et élevage de l'Europe de l'époque, cela aurait plutôt favorisé la dispersion des ménages qui les composent plutôt qu'une disette comme dans un Niger déjà saturé et en état de limite. L'hypothèse « familles élargies rubanées » suffirait pour expliquer (i) la surprenante disposition en longueur des maisons où la largeur reste standard d'une maison à l'autre mais où les longueurs varient considérablement, comme des boîtes qui s'additionneraient, (ii) la surprenante puissance d'expansion de cette culture capable en 400 ans d'occuper la moitié de l'Europe quand les cultures contemporaines stagnaient, (iii) le non moins surprenant effondrement apparent de cette culture, avec des traces de tension au préalable. Une modélisation *ceteris paribus* testant les différents types de famille sur ces trois points (i), (ii) et (iii) pourrait être entreprise pour confirmer cette hypothèse.

6.6 Conclusion partielle

Ces quatre ensembles de piste différenciés s'interpénètrent et se nourrissent : travailler sur le formalisme de la modélisation doit permettre de faciliter la « traduction » de questionnements géographiques et anthropologiques, les questions socio-anthropologiques sont de fait des tentatives de systématiques des voies d'action des différences de vulnérabilités et de dépendances. De même, les questionnements géographiques sont des propositions de systématiques des dynamiques reliant socio-anthropologie et disponibilité des ressources et des moyens de production. Les trois hypothèses locales sont une mise à l'épreuve d'observations sur le terrain par lesquelles se révèlent des combinaisons locales d'interactions hommes-milieus qui génèrent elles-mêmes des dynamiques particulières.

⁷² Même si l'orpaillage ou le braconnage en Guyane, les concessions de mines, la coupe de bois illégale ou le braconnage en Orient montrent que ce n'est pas entièrement avéré

⁷³ Equateur, Brésil et Guyane française ont tous une fécondité inférieure à 3 enfants par femme

De facto, elles se nourrissent effectivement l'une l'autre et c'est au travers de l'expérience accumulée et le temps long passé sur un terrain qu'elles peuvent être menées de front et ensemble, car séparément, ces démarches ne peuvent être nourries. C'est pourquoi ces différentes perspectives doivent être ici présentées comme un ensemble cohérent, à approcher progressivement par l'accumulation de temps sur le terrain, par la démarche modulaire, accumulatrice pour la part de modélisation de mon travail. Cependant, ce programme d'actions de recherche trouvera d'autant sa cohérence dans un contexte de stabilité des moyens de recherche, et pas forcément de grande abondance de ces moyens. L'incertitude quant à ces moyens implique de mener de front ces démarches et de les intégrer comme des modules pouvant être investigués dans différentes circonstances et terrain, facilitant ainsi involontairement l'interdisciplinarité de ma démarche. Néanmoins, comme on a pu le montrer pour la mise en place d'interactions entre acteurs en territoires de développement, toute action de construction nécessite du temps pour de bonnes fondations. Et laisser du temps pour que les choses se fassent n'est jamais du temps perdu.

7 Conclusion générale

Mon parcours professionnel et personnel, quelque peu chaotique avant mon recrutement au CNRS et quelque peu dispersé après, m'a donné l'occasion de me confronter à des problématiques en apparence très diverses, tant par les sociobiomes étudiés que par les enjeux, les outils et les problématiques abordés. Mais nous avons vu qu'une préoccupation commune regroupait ces questionnements, celle de comprendre le fonctionnement des systèmes socio-écologiques ruraux, tant dans sa composante humaine que biophysique.

Ce parcours a aussi été l'occasion de faire des rencontres professionnelles infiniment enrichissantes intellectuellement, de construire des collaborations progressivement pérennes avec d'autres scientifiques et acteurs du développement sur des enjeux d'importance toujours plus cruciale. Plus encore, l'évolution de ma réflexion s'oriente effectivement de plus en plus vers les enjeux de vulnérabilité de populations rurales ou de parties d'entre elles face aux risques et chocs possibles, passé ou à venir.

Effectivement, l'intégration de la dimension socio-anthropologique dans une approche intégrée, longtemps différée par l'aspect qualitatif des sciences humaines et sociales, devient enfin accessible grâce à ces atouts que sont les approches sociogéographiques et les modélisations multi-agents spatialisée, interfaces de collecte, d'adaptation et d'intégration de ces dimensions. Cette intégration permet ainsi de finaliser la traduction en un système cohérent des rationalités humaines, des pratiques sociales et d'utilisation des ressources et des mécanismes biophysiques qui constituent ensemble un système socio-écologique rural et pour reprendre Descola (2015), d'aller quelque peu au-delà de la binarité Nature et Culture.

Elle a aussi permis d'élargir le regard sur l'idée de modélisation de ces systèmes, pas seulement transposition mais formalisation et simplification négociée, prisme partiel assumé, défini par une ou plusieurs questions de recherche, mais réfutable, questionnable, lui donnant ainsi sa valeur en tant que méthode de recherche scientifique.

Elle permet également, j'ose le croire, d'aborder des dynamiques sociales sur des espaces ruraux en construction avec un regard en perspective, où le poids de certaines dynamiques initialement difficilement détectables, mais puissantes et lourdes de conséquence peut ainsi être rendu, décrit et appréhendé en termes d'impact sur le territoire et d'effets à long terme.

Bien sûr, toute cette démarche est loin d'être entièrement assise et il reste encore à mieux compiler les composantes et à formaliser les tests, en particulier statistiques. Pour autant, il me paraît de plus en plus nécessaire de se pencher sur ces effets de vulnérabilité différentielle, de robustesse face aux chocs et aux rétroactions socio-environnementales des sociétés humaines face aux crises qui s'annoncent.



Bibliographie

- Abar S., Theodoropoulos G.K., Lemarinier P., O'Hare G.M.P. 2017. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review* 24, 13–33. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>
- Ajayi J.F.A. 1985. Histoire générale de l'Afrique tome VI : L'Afrique du XIXème à 1880, Comité scientifique international pour la rédaction d'une Histoire générale de l'Afrique. UNESCO, Paris, France.
- Amblard F., Rouchier J., Bommel P. 2006. Evaluation et validation de modèles multi-agents. In : Amblard, F., Phan, D. (Eds.), *Modélisation et Simulations Multi-Agents : Application Pour Les Sciences de l'Homme et de La Société*. Hermes, Paris, France, pp. 103–140.
- Anderies J.M., Janssen M.A., Bousquet F., Cardenas J.C., Castillo D., Lopez M.C., Tobias R., Vollan B., Wutich A. 2011. The challenge of understanding decisions in experimental studies of common pool resource governance. *Ecological Economics* 70, 1571–1579.
- Axtell R.L., Epstein J.M., Dean J.S., Gumerman G.J., Swedlund A.C., Harburger J., Chakravarty S., Hammond R., Parker J., Parker M. 2002. Population growth and collapse in a multiagent model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley. *P.N.A.S.* 99, 7275–7279.
- Azuara J., Lebreton V., Peyron O., Mazier F., Combourieu-Nebout N. 2018. The Holocene history of low altitude Mediterranean *Fagus sylvatica* forests in southern France. *J. Veg. Sci.* 29, 3, 438-449.
- Baba T.S. 2013. Ménage et appréciation des pratiques féminines (dans la vie conjugale) au sein de la société Kanuri. Mckaye Hassane Taïso, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, Vol.1(1), Oct. 2013, ISSN 1, 106.
- Bachelard G. 1938. La formation de l'esprit scientifique. *Vrin* 8, 123.
- Balandier G. 1955. *Sociologie actuelle de l'Afrique noire, Essais*. Point, Paris, France.
- Bánffy E., Höhler-Brockmann H. 2020. Burnt daub talking the formation of the LBK longhouse (a work hypothesis). *Quaternary International*. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.06.007>
- Banoïn, M., Guenguant, J.-P., 1999. Les systèmes agraires traditionnels nigériens dans l'impasse face à la démographie. In : Floret, C., Pontanier, R. (Eds.), *Jachères et Systèmes Agraires*. CORAF/Union Européenne, Dakar, Sénégal, pp. 1–14.
- Barboni D., Harrison S. P., Bartlein P. J., Jalut G., New M., Prentice I. C., Sanchez Goñi M.-F., Spessa A., Davis B., Stevenson A. C. 2004. Relationships between plant traits and climate in the Mediterranean region: A pollen data analysis. *J. Veg. Sci.* 15, 5, 635-646. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02305.x>
- Barker G. 1985. *Prehistoric farming in Europe*, Cambridge University press, 327 p.
- Barreteau O. 2003. The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes: characterization of associations. *JASSS* 6.
- Barreteau O., Le Page C., d'Aquino P. 2003. Role-playing games, models and negotiation processes. *JASSS* 6.
- Barry L.S. 2000. L'union endogame en Afrique et à Madagascar. *L'Homme*, Éditions de l'EHESS 154–155. <https://doi.org/10.4000/lhomme.22>
- Baum T. G. 2014. Models of wetland settlement and associated land use in South-West Germany during the fourth millennium B.C. *Veget Hist Archaeobot* 23, 67–80.
- Becerra S., Saqalli M., Gangneron F., Dia A. H. 2016. Everyday vulnerabilities and “social dispositions” in the Malian Sahel, an indication for evaluating future adaptability to water crises? *Regional Environmental Change* 16, 1253–1265. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0845-7>
- Becu N., Neef A., Schreinemachers P., Sangkapitux C. 2008. Participatory computer simulation to support collective decision-making: Potential and limits of stakeholder involvement. *Land Use Policy* 25, 498–509.
- Bedault L., Hachem L. 2008. Recherches sur les sociétés du Néolithique danubien à partir du Bassin parisien : approche structurelle des données archéozoologiques. In : Burnez-Lanotte L., Ilett M., Allard P. (Eds.). *Fin des traditions danubiennes dans le Néolithique du Bassin Parisien et de la Belgique (5100-4700 BC)*. pp. 222–243.
- Béguet E. 2016. « Del monte, del campo, o del pueblo ? » : subsister en zone pétrolière chez les Shuar d'Amazonie équatorienne. (Master Anthropologie). Université Paris 10 Paris Ouest Nanterre La Défense, Paris, France.
- Bettinger R.L. 2001. Echoes from the dreamtime. *Nature* 413, 567–568. <https://doi.org/10.1038/35098127>
- Bickle P. 2020. Thinking Gender Differently: New Approaches to Identity Difference in the Central European Neolithic. *Cambridge Archaeological Journal* 30, 201–218. <https://doi.org/10.1017/S0959774319000453>

- Biershenk T., Chauveau J.-P., Olivier de Sardan J.-P. 2000. Courtiers en développement. Les villages africains en quête de projet. APAD-Karthala, Paris, France.
- Biershenk T., Olivier de Sardan J.-P. 1994. ECRIS : Enquête Collective Rapide d'Identification des conflits et des groupes Stratégiques. Bulletin de l'APAD Les sciences sociales et l'expertise en développement.
- Bocquet-Appel J.-P. 2012. Réponses aux famines des foyers domestiques agricoles : données ethno-historiques et modélisation archéologique.
- Bocquet-Appel J.-P., Bar-Yosef O. 2008. The Neolithic demographic transition and its consequences. Springer, Amsterdam, the Netherlands.
- Bocquet-Appel J.-P., Naji S. 2006. Testing the Hypothesis of a Worldwide Neolithic Demographic Transition: Corroboration from American Cemeteries. *Current Anthropology* 47, 341–365.
- Bogaard A. 2002. Questioning the relevance of shifting cultivation to Neolithic farming in the loess belt of Europe: evidence from the Hambach Forest experiment. *Vegetation History and Archaeobotany*, 11, 1, 155-168.
- Boilat P.-D. 1953. Esquisses sénégalaises : physionomie du pays, peuplades, commerce, religions... P. Bertrand, Paris, France.
- Bommel P. 2009. Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles multi-agents adaptée à la gestion des ressources renouvelables (PhD Informatique). Université Montpellier II Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, France.
- Bommel P. 2020. Modélisation participative et simulation interactive pour accompagner la gestion des communs (HDR Informatique). Université Montpellier II Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, France.
- Bonaccorsi J., Nonjon M. 2012. « La participation en kit » : l'horizon funèbre de l'idéal participatif. *Quaderni* 79: Produire la démocratie, 29–44.
- Boserup E. 1965. The conditions of agricultural growth; the economics of agrarian change under population pressure. George Allen & Unwin Ltd. Ruskin House Museum St, London, UK.
- Boserup E. 1976. Environment, Population, and Technology in Primitive Societies. *Population and Development Review* 2, 21–36.
- Boubacar Y. 2004. Les mutations des systèmes agraires et des modes d'usage des ressources naturelles dans la zone centrale du Niger. *Revue de géographie alpine* 92, 97–110.
- Bourbouze A. 2002. Les élevages en Afrique du Nord. Museum Agropolis, Montpellier, France.
- Bousquet F., Gautier D. 1999. Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches "spatiale" et "acteurs." *Cybergeo : European Journal of Geography* 89.
- Bousquet F., Le Page C. 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling* 176, 313–332.
- Bousquet F., Antona M., Aubert S., Barnaud C., Barreteau O., Bécu N., Boisseau S., Bommel P., Botta A., Castella J.-C. 2009. La posture d'accompagnement des processus de prise de décision : les références et les questions transdisciplinaires. In : Hervé D. Laloë F. (Eds.) *Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés*. Quæ éditions, Versailles, France, 71–89.
- Boutrais J. 2007. Crises écologiques et mobilités pastorales au Sahel : les Peuls du Dallol Bosso (Niger). *Science et changements planétaires / Sécheresse* 18, 5–12.
- Bouzou M. I. 2000. Gestion des ressources naturelles et évolution des systèmes agraires dans la région de Maradi, Drylands Research. Crewkerne.
- Boyer F., Mounkaïla H. 2010. Partir pour aider ceux qui restent ou la dépendance face aux migrations. *Hommes & migrations* 1286–1287, 212–220. <https://doi.org/10.4000/hommesmigrations.1752>
- Brenner T., Werker C. 2007. A practical guide to inference in simulation models, Papers on Economics and Evolution. Max Planck Institute of Economics Evolutionary Economics Group, Jena, Germany.
- Busson H., Clozel G. 1913. Le Soudan français d'après une récente enquête. *Annales de Géographie* 22, 326–336.
- Cahierre M. 2019. Classification des espèces végétales en Types Fonctionnels de Plantes : Préalable à la modélisation de la couverture végétale du Languedoc-Roussillon au Néolithique (Master 2 Mode). Université de Rennes 1, Rennes, France.
- Campo P. C., Bousquet F., Villanueva T.R. 2010. Modelling with stakeholders within a development project. *Environmental Modelling & Software* 25, 1302–1321.
- Carley K. M. 1996. Validating Computational Models. Carnegie Mellon University.
- Castella J.-C. 2009. Assessing the role of learning devices and geovisualisation tools for collective action in natural resource management: Experiences from Vietnam. *Journal of Environmental Management* 90, 1313–1319.

- Castella J.-C., Verburg, P.H. 2007. Combination of process-oriented and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam. *Ecological Modelling* 202, 410–420.
- Chalmers A.F. 1982. Qu'est-ce que la science ? Popper, Khun, Lakatos, Feyerabend, 2^{ème} éd. La Découverte, Paris, France.
- Chiappori P.-A., Donni O. 2006. Les modèles non unitaires de comportement du ménage : un survol de la littérature. *L'actualité économique* 82, 9–52.
- Childe V. G. 1929. *The Danube in prehistory*. Clarendon, Oxford.
- Conte E. 1979. Politics and marriage in South Kanem (Chad): A statistical presentation of endogamy from 1895 to 1975. *Cahiers de L'Orstom* 101–16, 262–275.
- Coquery-Vidrovitch C., Moniot H. 1974. *L'Afrique Noire de 1800 à nos jours*, Nouvelle Clio : L'histoire et ses problèmes. Presses Universitaires de France, Paris, France.
- Crosetto M., Stefano T., Saltelli, A. 2006. Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. *Agr.Eco.Env.* 81, 71–79.
- Crozier M., Friedberg E. 1977. *L'acteur et le système. Dynamiques de l'action collective*. Seuil, Paris, France.
- Custode E., Sourdat M. 1986. Paisajes y suelos de la Amazonía ecuatoriana: entre la conservación y la explotación. *Revista del Banco Central del Ecuador* 24, 325–339.
- Dardel C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougin, E., Grippa, M., Tucker, C.J. 2014. Re-greening Sahel: 30years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment* 140, 350–364. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.011>
- Daudé E. 2004. Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion. *Cybergeog : European Journal of Geography* 255. <https://doi.org/10.4000/cybergeog.3835>
- Davy D., Tritsch I., Grenand, P. 2012. Construction et restructuration territoriale chez les Wayãpi et Teko de la commune de Camopi, Guyane française. *Confins* 16.
- De Rosnay J. 2014. *Le microscope. Vers une vision globale*. Seuil, Paris, France.
- De Souza J.G., Schaan D.P., Robinson M., Barbosa A. D., Aragão L.E., Marimon Jr, B.H., Marimon, B.S., da Silva, I. B., Khan S.S., Nakahara, F.R. 2018. Pre-Columbian earth-builders settled along the entire southern rim of the Amazon. *Nature communications* 9, 1–10.
- Deffuant G., Huet, S., Amblard, F. 2005. An Individual-Based Model of Innovation Diffusion Mixing Social Value and Individual Benefit. *Am.J.Soc.* 110, 1041–1069.
- Demont M., Jouve, P., Stessens, J., Tollens, E. 2004. Boserup vs Malthus revisités : évolution des exploitations agricoles dans le Nord de la Côte d'Ivoire. Département d'Economie Agricole et de l'Environnement, K.U.Leuven.
- Demoule J.-P. 1999. La société contre les princes. *Publications de l'École Française de Rome* 252, 125–134.
- Demoule J.-P. 2010. *La révolution Néolithique dans le monde*, CNRS Alpha. CNRS Editions, Paris, France.
- Descroix L. 2018. Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Soudano-sahélienne. *Archives contemporaines*.
- Descola P. 1993. *Les lances du crépuscule : relations Jivaros, Haute-Amazonie*. Plon, Paris, France.
- Descola P. 2015. *Par-delà nature et culture*. Gallimard, Paris, France.
- Diaz S., Hodgson J.G., Thompson K., Cabido M., Cornelissen J.H.C., Jalili A., Montserrat-Martí G., Grime J.P., Zarrinkamar F., Asri Y., Band S.R., Basconcelo S., Castro-Díez P., Funes G., Hamzehee B., Khoshnevi M., Pérez-Harguindeguy N., Pérez-Rontomé M.C., Shirvany F. A., Vendramini F., Yazdani S., Abbas-Azimi R., Bogaard A., Boustani S., Charles M., Dehghan, M., Torres-Espuny L., Falczuk V., Guerrero-Campo, J., Hynd, A., Jones, G., Kowsary E., Kazemi-Saeed F., Maestro-Martínez M., Romo-Díez A., Shaw S., Siavash B., Villar-Salvador P., Zak M. R. 2009. The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science* 15, 295–304. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02266.x>
- Donni O. 2004. La théorie des modèles non coopératifs d'offre de travail et ses applications empiriques. Université du Québec en Outaouais / CNRS / ENS.
- Dubouloz J. 2003. Datation absolue du premier Néolithique du Bassin parisien : complément et relecture des données RRPB et VSG. *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 100, 671–689.
- Dubouloz J. 2008. Impacts of the Neolithic Demographic Transition on Linear Pottery Culture Settlement, in: Bocquet-Appel Jean-Pierre, Bar-Yosef Ofer (Eds.). *The Neolithic Demographic Transition and Its Consequences*. Springer Netherlands, Amsterdam, the Netherlands, pp. 207–235.
- Dubouloz J. 2010. Impacts de la transition démographique néolithique sur l'habitat de la Culture à céramique linéaire. Rapport INRAP, Centre René-Ginouvès, Université de Nanterre, Nanterre, France.

- Dubouloz J., Chartier M., Hachem L., Ilett M. 2009. Interdépendance et cohésion des différents niveaux de territorialité au néolithique rubané en bassin parisien. In : Charpentier, V., Marcigny, C. (Eds.), *Des hommes aux champs : Pour une archéologie des espaces ruraux du Néolithique au Moyen Age*. Presses Universitaire de Rennes, Rennes, France, pp. 23–34.
- Dupraz C., Liagre, F. 2008. *Agroforesterie : des arbres et des cultures*. France Agricole Editions.
- Ega L. A. 1983. Societal formation and the evolution of land tenure system in the Zaria emirate of Northern Nigeria. *Agricultural Administration* 13, 239–248. [https://doi.org/10.1016/0309-586X\(83\)90042-0](https://doi.org/10.1016/0309-586X(83)90042-0)
- Etienne M. 2010. *La modélisation d'accompagnement : Une démarche participative en appui au développement durable*. Editions QUAE, Montpellier, France.
- Etienne M., Le Page C., Cohen M. D. 2003. A Step-by-step approach to building land management scenarios based on multiple viewpoints on multiagent system simulations. *JASSS* 6.
- Etienne M., DuToit D., Pollard S. 2011. ARDI: a co-construction method for participatory modelling in natural resources management. *Ecology & Society* 16, 44.
- Fallot A., Le Coq J.-F., Salinas J.C., Aguilar T., Cronenbold R., Vides-Almonacid R., Devisscher T. 2015. *Building a shared representation of the landscape as a socio-ecological system and visualizing the challenges of climate-smart agriculture*. Climate-Smart Agriculture, Montpellier, France.
- Fechner K., Langhor R., Mikkelsen J. H. Becze-Deàk J. 1995. Affectation humaine et fertilité des sols au Néolithique ancien sur quelques sites du Grand-Duché de Luxembourg et de Lorraine, 22^{ème} colloque interrégional Néolithique. *Cahier association promotion de la recherche archéologique en Alsace*, Strasbourg, p. 197-212.
- Ferber J. 1999. *Multi-agent systems. An introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-Wesley Longman, London, UK.
- Fick S. E., Hijmans R. J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37, 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fuller D. Q., Allaby R. G., Stevens C. 2010. Domestication as innovation: the entanglement of techniques, technology and chance in the domestication of cereal crops. *World Archaeology* 42, 13–28. <https://doi.org/10.1080/00438240903429680>
- Gado B. A. 1993. *Une histoire des famines au Sahel : étude des grandes crises alimentaires (19ème-20ème siècle)*. L'Harmattan, Paris, France.
- Galop D., Carozza, L., Magny M., Guilaine J. 2009. Rhythms & causalities of the anthropisation dynamics in Europe between 8500 and 2500 cal BP: Sociocultural and/or climatic assumptions. *Quaternary International* 200, 1–3.
- Garenne M., Cantrelle P. 2020. *L'anthropométrie des enfants de la vallée du fleuve Sénégal : Situation en 1957 comparée aux évolutions ultérieures*. Document de travail Indicateurs de développement, Fondation pour les études et recherches sur le développement international 267.
- Garneau T., Delisle S. 2002. *Programmation orientée-agent : évaluation comparative d'outils et environnements. JFIADSMA'02 Systèmes multi-agents et systèmes complexes (ingénierie, résolution de problèmes et simulation)*, Hermes Sciences, Québec, Canada, pp. 111–123.
- Gautier D. 1997. La prise en compte des dynamiques spatiales pour modéliser la mise en valeur des espaces ruraux. *Cybergeo : European Journal of Geography* 25. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.5431>
- Gavian S., Fafchamps M. 1996. Land tenure and allocative Efficiency in Niger. *Am. J. Agr. Econ.* 78, 460–471.
- Gershovich M. 2012. *French Military Rule in Morocco: Colonialism and its Consequences*. Routledge, London, UK.
- Giampietro M. 1997. Socioeconomic pressure, demographic pressure, environmental loading and technological changes in agriculture. *Agr. Eco. Env.* 65, 201–229.
- Giampietro M., Bukkens S.G.F., Pimentel D. 1993. Labor productivity: A biophysical definition and assessment. *Human Ecology* 21, 229–260.
- Gilbert N., Troitzsch K. 2005. *Simulation for the social scientist*. McGraw-Hill Education, London, UK.
- Goddard A.D. 1973. Changing family structures among the Rural Hausa. *Africa* 43, 207–218. <https://doi.org/10.2307/1158523>
- Gomart L., Hachem L., Hamon C., Giligny F., Ilett M. 2015. Household integration in Neolithic villages: A new model for the Linear Pottery Culture in west-central Europe. *Journal of Anthropological Archaeology* 40, 230–249. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2015.08.003>
- Goody J., Goody J.R. 1976. *Production and reproduction: a comparative study of the domestic domain*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- Greenberg J. H. 1947. Islam and clan organization among the Hausa. *Southwestern Journal of Anthropology* 3, 193–211. <https://doi.org/10.1086/soutjanth.3.3.3628775>
- Grégoire E. 1986. Les Alhazai de Maradi, Niger : Histoire d'un groupe de riches marchands sahéliens, Travaux et Documents. ORSTOM, Paris, France.
- Grégoire E. 1986. Les Alhazai de Maradi, Niger : Histoire d'un groupe de riches marchands sahéliens, Travaux et Documents. ORSTOM, Paris, France.
- Grenand P., Grenand F. 1979. Les amérindiens de Guyane française aujourd'hui : Eléments de compréhension. *Journal de la Société des Américanistes* 66, 361–382.
- Grimm V., Berger U., Bastiansen F., Eliassen S., Ginot V., Giske J., Goss-Custard J., Grand T., Heinz S.K., Huse G., Grimoult C. 2000. Histoire de l'évolutionnisme contemporain en France, 1945-1995. Librairie Droz.
- Gueye L. 1989. L'intégration agriculture-élevage dans la moyenne vallée du Sénégal (PhD Veterinary Studies). Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.
- Hachem L. 1999. Apport de l'archéozoologie à la connaissance de l'organisation villageoise rubanée. In : Braemer F., Cleuziou S., Coudart A. (Eds.), *Habitat et Société*. Editions APDCA, Antibes, pp. 325–338.
- Haddadi, A. 1996. Belief-Desire-Intention Agent. *Foundations of distributed artificial intelligence* 9, 169.
- Hama B. 1967. Histoire traditionnelle d'un peuple, Les Zarma-Songhay. Publication de la république du Niger, Niamey, Niger.
- Hammel E. A. 2005. Chayanov revisited. A model for the economics of complex kin units. *P.N.A.S.* 102, 7043–7046.
- Hammel R. 2000. Terroirs d'attache des pasteurs au Niger.
- Happe K., Balmann A. 2008. Doing policy in the lab! Options for the future use of model-based policy analysis for complex decision-making. 107th EAAE Seminar "Modelling of Agricultural and Rural Development Policies."
- Harigan J. A., Wong M. A. 1979. Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm. *Appl. Stat.* 28, 100-108.
- Harlow, S., Cummings, R., Aberasturi, S.M., 2007. Karl Popper and Jean Piaget: A Rationale for Constructivism. *null* 71, 41–48. <https://doi.org/10.1080/00131720608984566>
- Harrison S. P., Prentice I. C., Barboni D., Kohfeld K. E., Ni J., Sutra J.-P. 2010. Ecophysiological and bioclimatic foundations for a global plant functional classification. *J. Veg. Sci.* 21, 2, 300-317.
- Harragin S. 2006. *The Cost of being Poor: Markets, mistrust and malnutrition in southern Niger 2005-2006*. Save the Children, London, UK.
- Hein L. 2006. The impacts of grazing and rainfall variability on the dynamics of a Sahelian rangeland. *Journal of Arid Environments* 64, 488–504.
- Hickler T., Vohland K., Feehan J., Miler P. A. Smith B., Costa L., Giesecke T., Fronzek S., Carter T. R., Cramer W., Kühn I., Sykes M. 2012. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 21, 1, 50-63.
- Hiernaux P., Dardel C., Kergoat L., Mougin E., Behnke R. H., Mortimore M. 2016. Desertification, adaptation and resilience in the Sahel: lessons from long term monitoring of agro-ecosystems. In: *The end of desertification?* Springer Earth System Sciences, Berlin, Germany, pp. 147–178.
- Hiernaux P., Turner M. D. 2002. The influence of farmer and pastoralist management practices on desertification processes in the Sahel. In: Reynolds J. F., Sattford S. D. M. (Eds.). *Global desertification: do humans cause deserts?* Dahlem University Press, Berlin, Germany, pp. 136–147.
- Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L., Jones P. G., Jarvis A. 2005. Very High Resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25, 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Houssou N. L. J. 2016. Simulation sociale à base d'agents du comportement microéconomique des ménages en Amazonie Equatorienne, face aux contaminations pétrolières, aux dynamiques économiques et aux politiques publiques. (M. Sc. Informatique). Université nationale du Vietnam, Institut francophone international, Hanoi, Vietnam.
- Houssou N. L. J., Cordero J., Bouadjio-Boulic A., Morin L., Maestripieri N., Ferrant S., Belem M., Pelaez Sanchez J. I., Saenz M., Lerigoleur E., Elger A., Gaudou B., Maurice L., Saqalli M. 2019. Synchronizing histories of exposure and demography: the construction of an agent-Based model of the Ecuadorian Amazon colonization and exposure to oil pollution hazards. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 22, 1. <https://doi.org/10.18564/jasss.3957>
- Huth A., Jepsen J. U., Jørgensen C., Mooij W. M., Müller B., Pe'er G., Piuu C., Railsback S.F., Robbins A.M., Robbins M. M., Rossmanith E., Rüter N., Strand E., Souissi S., Stillman R. A., Vabø R., Visser U., DeAngelis D. L. 2006. A

- standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling* 198, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023>
- IRD, Carte pédologique de reconnaissance de la République du Niger : Niamey, Maradi et Zinder. 1964.
- Iversen J. 1941. Land occupation in Denmark's Stone Age. *Danemarks Geologiske Undersogelse*, II, 66, 1-68.
- Janssen M. A. 2009. Understanding artificial Anasazi. *JASSS* 12, 13.
- Johnston, H. A. S. 1967. *The Fulani Empire of Sokoto*. London, Oxford UP.
- Kieken H. 2003. Le rôle des modèles dans la gestion de l'environnement. 10^{èmes} Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels de Rochebrune : Le statut épistémologique de la simulation.
- Kieken H., Mermet L. 2005. Le rapport Meadows sur les limites de la croissance Un exemple archétypal de débat prospectif fondé sur une modélisation. In : Mermet L. (Ed.), *Étudier des écologies futures : un chantier ouvert pour les recherches prospectives environnementales*. Presses Universitaire Européennes, Bruxelles, Belgium.
- Ki-Zerbo J. 1972. *Histoire de l'Afrique noire*. Hatier, Paris, France.
- Kohler T. A., Kyle R. Bocinsky, Cockburn D., Crabtree S. A., Varien M. D., Kolm K. E., Smith S., Ortman S. G., Kobti Z. 2012. Modelling prehispanic Pueblo societies in their ecosystems. *Ecological Modelling* 241, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.01.002>
- Kreuz A., Pomázi P., Bánffy E. 2020. Hungarian Neolithic landscapes, crops and diet – Signs of cultural decisions? *Quaternary International*. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.06.008>
- Lassègue J. 1996. What kind of Turing test did Turing have in mind? *Tekhnema: Journal of Philosophy and Technology* 3, 37–58
- Latour B. 2017. *Où atterrir? Comment s'orienter en politique*. La Découverte, Paris, France.
- Laurent P.-J. 2009. *Les pentecôtistes du Burkina Faso : mariage, pouvoir et guérison*. Karthala, Paris, France.
- Leach E. 1989. *Claude Lévi-Strauss*. University of Chicago Press.
- Leclercq G., Sy, O. 2011. Des indicateurs spatialisés des transhumances pastorales au Ferlo. *Cybergeogeo : European Journal of Geography* 532. <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.23661>
- Lemmen C. 2012. Changing human-environment interactions in regional transitions to agriculture. *Quaternary International* 279–280, 276. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.08.709>
- Lévi-Strauss C. 1958. *Anthropologie structurale*. Plon, Paris, France.
- Livet P., Phan D., Sanders L. 2014. Diversité et complémentarité des modèles multi-agents en sciences sociales. *Revue française de sociologie* 55, 689–729. <https://doi.org/10.3917/rfs.554.0689>
- Lockwood M. 1997. Sons of the soil? Population growth, environmental change and men's reproductive intentions in northern Nigeria. *International Journal of Population Geography* 3, 305–322. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1220\(199712\)3:4<305::AID-IJPG73>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1220(199712)3:4<305::AID-IJPG73>3.0.CO;2-Y)
- Loireau-Delabre M. 1998. *Espaces Ressources Usages : Spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et écologiques au Sahel nigérien, site de Banizoumbou, Niger* (ph. D. Geography). Université Paul Valéry Montpellier III, Montpellier, France.
- Luxereau A., Roussel B. 1997. *Changements écologiques et sociaux au Niger, Etudes Africaines*. L'Harmattan, Paris, France.
- M'bokolo E., Le Callennec S. 2004. *Afrique noire : histoire et civilisations : 19^{ème} à nos jours*. Hatier, Paris, France.
- Mahamane A. 2001. *Usages des terres et évolutions végétales dans le Département de Maradi*, Drylands Research. Crewkerne.
- Manzo G. 2014. Potentialités et limites de la simulation multi-agents : une introduction. *Revue française de sociologie* 55, 653–688. <https://doi.org/10.3917/rfs.554.0653>
- Manzo G., Gabbriellini S., Roux V., M'Mbogori F.N. 2018. Complex Contagions and the Diffusion of Innovations: Evidence from a Small-N Study. *Journal of Archaeological Method and Theory*. <https://doi.org/10.1007/s10816-018-9393-z>
- Mathieu M.-L. 2002. *Donnant-donnant. Les stratégies d'acteurs villageois face aux conditionnalités des projets de développement au Mali* (PhD Anthropologie). Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales- EHESS Marseille, Marseille, France.
- Mauri A., Davis B. A. S., Collins P.M., Kaplan J. O. 2015. The climate of Europe during the Holocene: a gridded pollen-based reconstruction and its multi-proxy evaluation. *Quaternary Science Reviews* 112, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.013>
- Mayer I., Warmelink H., Zhou Q. 2016. A frame-reflective discourse analysis of serious games. *British Journal of Educational Technology* 47, 342–357. <https://doi.org/10.1111/bjet.12245>

- Mazoyer, M., Roudart, L., 1997. Histoire des agricultures du monde, du Néolithique à la crise contemporaine. Seuil, Paris, France.
- McDowell C. M. 1964. Introduction to the problems of ownership of land in Northern Nigeria. *Nigerian LJ* 1, 202.
- McDowell C. M. 1966. The breakdown of traditional land tenure in northern Nigeria. In: *Ideas and Procedures in African Customary Law*, 8th International African Seminar. Routledge, Addis-Ababa, Ethiopia, pp. 266–278.
- Meadows D. H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W., Conca K., Dabelko G. D. 1972. The limits to growth. In: *Green Planet Blues: Critical Perspectives on Global Environmental Politics*. Routledge, London, New York, USA.
- Méjean R., Chapuis K., Kaced D., Saqalli M., Paegelow M. Towards "Socializing the pixel" and "Pixelizing the social" with GAMA platform : an Agent-Based Model of Land Use and Land Cover Changes in Northern Ecuadorian Amazon. 10th IEMS Conference, Brussels, 09/2020
- Mertz O., Ravnborg H. M., Lövei G. L., Nielsen I., Konijnendijk C.C. 2007. Ecosystem services and biodiversity in developing countries. *Biodiversity and Conservation* 16, 2729–2737.
- Milleville P. 1989. Risques et pratiques paysannes : diversité des réponses, disparité des effets. In : Eldin M., Milleville P. (Eds.), *Le risque en agriculture*. INRA-SAD, Paris, France, pp. 179–186.
- Morin L. 2015. Diagnostic agraire d'un front pionnier en Amazonie équatorienne, Paroisse de Dayuma, province d'Orellana, Equateur (M. Sc. Agronomie). SupAgro Montpellier IRC, Montpellier, France.
- Morris M.D. 1991. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics* 33, 161–174.
- Mortimore M. J., Tiffen M., Boubacar Y., Nelson J. 2001. Synthèse sur les évolutions à long terme dans le département de Maradi, Niger 1960-2000, Drylands Research. Crewkerne.
- Mounkaïla H. 2003. De la migration circulaire à l'abandon du territoire local dans le Zarmaganda (Niger). *Revue Européenne des Migrations Internationales* 18, 161–187.
- Müller J.-P. 1998. Les modèles actuels de l'émergence. Journées de Rochebrune, Megève, France.
- Nazoumou Y., Favreau G., Adamou M.M., Maïnassara I. 2016. La petite irrigation par les eaux souterraines, une solution durable contre la pauvreté et les crises alimentaires au Niger ? *Cahiers Agricultures* 25. <https://doi.org/10.1051/cagri/2016005>
- Newson L. A. 1996. The Population of the Amazon Basin in 1492: A View from the Ecuadorian Headwaters. *Transactions of the Institute of British Geographers* 21, 5–26. <https://doi.org/10.2307/622921>
- Ngana F., Sougnabé P., Gonné B., Ababa A.M. 2009. Transformations foncières dans les espaces périurbains en Afrique centrale soudanienne. Conférence Savanes africaines en développement : innover pour durer, Cirad, Garoua, Cameroun, pp. 9-p.
- Niane D. T. 1985. Histoire générale de l'Afrique tome IV : L'Afrique du XIIe au XVIe siècle, Comité scientifique international pour la rédaction d'une Histoire générale de l'Afrique. UNESCO, Paris, France.
- Nielsen U., Mertz O., Noweg G. T. 2006. The Rationality of Shifting Cultivation Systems: Labor Productivity Revisited. *Hum Ecol* 34, 201–218.
- Ogo B.A. 1985. Histoire générale de l'Afrique tome V : L'Afrique du XVIème au XVIIIème, Comité scientifique international pour la rédaction d'une Histoire générale de l'Afrique. UNESCO, Paris, France.
- Olivier de Sardan J.-P. 1990. Populisme développementiste et populisme en sciences sociales: idéologie, action, connaissance. *Cahiers d'études africaines* 475–492.
- Olivier de Sardan J.-P. 1996. La violence faite aux données. Autour de quelques figures de la surinterprétation en anthropologie. *Enquête* 3.
- Olivier de Sardan J.-P. 2003a. Anthropologie et développement, essai en socio-anthropologie du changement social. APAD-Karthala, Paris, France.
- Olivier de Sardan J.-P. 2003b. Les sociétés Songhay-Zarma (Niger - Mali) Chefs, guerriers, esclaves, paysans... Karthala, Paris, France.
- Olivier de Sardan J.-P. 2008. La rigueur du qualitatif: les contraintes empiriques de l'interprétation socio-anthropologique. Académie Bruylant, Louvain-la-Neuve, Louvain-La-Neuve, Belgique.
- Olivier de Sardan J.-P., Bako M. A., Guillermet E., Hamani O., Issa Y., Koné M., Moha M. 2007. Analyse rétrospective de la crise alimentaire au Niger en 2005. Agence Française de Développement, Niamey, Niger.
- Olojo A. E. 2016. The Boko Haram crisis and the narratives of resistance in northern Nigeria : the case of Sokoto state (Doctorat de Sociologie). Université Sorbonne Paris Cité, Paris, France.
- Ortu E., Brewer S., Peyron O. 2006. Pollen-inferred paleoclimate reconstructions in mountain areas: problems and perspectives. *J. Quaternary Sci.* 21, 615–627.

- Ostrom E. 2005. Understanding institutional diversity. Princeton University Press, Princeton, USA.
- Ozainne S., Huysecom E., Mayor A., Robion-Brunner C., Soriano S. 2009. Une chronologie pour le peuplement et le climat du pays dogon : la séquence culturelle et environnementale du gisement d'Ounjougou (Mali). *Antropo* 18, 37–46.
- Paegelow M., Camacho-Olmedo M.-T. 2008. Modelling environmental dynamics. Springer.
- Paegelow M., Villa N., Cornez L., Ferraty F., Ferré L., Sarda P. 2004. Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne. *Cybergeo : European Journal of Geography* 295. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.2811>
- Paegelow M., Maestriperi N., Saqalli M. 2018. La prospective territoriale : de la modélisation spatio-temporelle aux scénarii futurs. In : *Systèmes Complexes : de la Biologie au territoire. Les dossiers d'Agropolis International*. Pal C.-V., Leon F., Paprzycki M., Ganzha M. 2020. A Review of Platforms for the Development of Agent Systems. ArXiv preprint arXiv: 2007.08961
- Paul J.-L., Bory A., Bellande A., Fabri A., Garganta E. 2003. Quel système de référence pour la prise en compte de la rationalité de l'agriculteur : du système de production agricole au système d'activité. INRA-CIRAD, Montpellier, France, pp. 46–52.
- Pérouse de Montclos M.-A. 2012. Boko Haram et le terrorisme islamiste au Nigeria : insurrection religieuse, contestation politique ou protestation sociale ? (No. 2012), *Questions de recherche / Research Questions*. Centre d'études et de recherches internationales (CERI-Sciences Po/CNRS), Paris, France.
- Popper K. R. 1985. Conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique. Payot, Paris, France.
- Poulain J.-P. 2002. *Sociologies de l'alimentation*. PUF. Paris. France.
- Prentice I. C., Guiot J., Huntley B., Jolly D., Cheddadi R. 1996. Reconstructing biomes from palaeoecological data: a general method and its application to European pollen data at zero and six ka. *Clim. Dyn*, 12, 185–194.
- Prentice I. C., Webb T. 1998. BIOME 6000: reconstructing global mid-Holocene vegetation patterns from palaeoecological records. *J. Biogeogr.* 25, 6, 997-1005.
- Radja K. 2003. La famille dans l'analyse économique : modélisation et représentations théoriques de la famille. Université Montesquieu Bordeaux IV, Bordeaux, France.
- Rasse M. 2008. La diffusion du Néolithique en Europe (7000-5000 av. J.C.) et sa représentation cartographique. *Mappemonde* 90.
- Raynaud C., Grégoire E., Janin P., Koecklin J., Lavigne-Delville P., Bradley P. 1997. Sahels, diversité et dynamiques des relations sociétés-nature. RID SEI, Paris, France.
- Requier-Desjardins M. 2000. Elevage, transhumance, Appropriation et contrat d'accès aux pâturages au Nord-Cameroun (PhD Anthropology). Université Paris, Paris, France.
- Richard-Hansen C., Davy D., Longin G., Gaillard L., Renoux F., Grenand P., Rinaldo R. 2019. Hunting in French Guiana across time, space and livelihoods. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7, 289. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00289>
- Rivet D. 2012. Histoire du Maroc, de Moulay Idris à Mohammed V. Fayard, Paris, France.
- Rowley-Conwy P. A. 1981. Slash and burn in the temperate European Neolithic. In: R. Mercer (Editor), *Farming practice in British Prehistory*. University Press, Edimburgh, p. 85-96.
- Rowley-Conwy P. A. 2011. Westward Ho! The Spread of Agriculturalism from Central Europe to the Atlantic. *Current Anthropology* 52, S431–S451.
- Rubio-Campillo X. 2015. Large Simulations and Small Societies: High Performance Computing for Archaeological Simulations, in: Wurzer G., Kowarik K., Reschreiter H. (Eds.), *Agent-Based Modeling and Simulation in Archaeology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 119–137.
- Santini M., Collalti A., Valentini R. 2014. Climate change impacts on vegetation and water cycle in the Euro-Mediterranean region, studied by a likelihood approach. *Reg. Environ. Change*, 14, 4, 1405-1418.
- Sapir J., Collectif. Et si la France avait continué la guerre. Éditions Tallandier, 2013.
- Saqalli, M. 2008. Le pouvoir des savoirs : enjeux et impacts des concepts sur le développement rural pour le Sahel nigérien. *Vertigo* 8.
- Saqalli M., Gérard B., Biolders C. L., Defourny P. 2010. Testing the impact of social forces on the evolution of Sahelian farming systems: A combined agent-based modeling and anthropological approach. *Ecological Modelling* 221, 2714–2727. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.004>

- Saqalli M., Dosso M, 2011. Draped heterogeneity, forced uniformity: when agro-environmental policies drive family development: The U Minh Thượng forest reserve, (Mekong delta, Vietnam), *Field Actions Science Reports*, 5 <http://journals.openedition.org/factsreports/765>
- Saqalli M., Biolders C. L., Defourny P., Gérard B. 2013. Reconstituting family transitions of Sahelian western Niger 1950-2000: an agent-based modelling approach in a low data context. *Cybergeo : European Journal of Geography* 634. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25760>
- Saqalli M., Salavert A., Bréhard S., Bendrey R., Vigne J.-D., Tresset A. 2014. Revisiting and modelling the woodland farming system of the early Neolithic Linear Pottery Culture (LBK), 5600-4900 B.C. *Veget. Hist. Archaeobot.* 23, 37–50. <https://doi.org/10.1007/s00334-014-0436-4>
- Saqalli M., Baum T. 2015. Pathways for scale reconciliation: Building ecological socio-modelling methodologies for a reconstitution of human past dynamics over a landscape. In: Chap. 8. Barceló J. A., Del Castillo F. (eds.) *Simulating prehistoric and ancient worlds*. Springer Computational Social Sciences. 233-255.
- Saqalli M. 2020. "Never go against the family": An enlarged communaury family structure for the Linear Band Ceramic culture hypothesis for explaining longhouses, colonization capacity and collapse. *World Archaeological Conference, Prague, Rép. Tchèque*.
- Schmidt C., Rounsevell M.D.A. 2006. Are agricultural land use patterns influenced by farmer imitation? *Agr. Eco. Env.* 115, 113–127.
- Schutte S. 2010. Optimization and Falsification in Empirical Agent-Based Models. *JASSS* 13, 2.
- Seignobos C. 2015. Boko Haram et le lac Tchad. Extension ou sanctuarisation ? *Afrique contemporaine* 255, 93–120. <https://doi.org/10.3917/afco.255.0093>
- Sévelin-Radiguet P. 2012. Usages et gestion du domaine forestier de Regina/Saint-Georges. *Confins* 16.
- Sougnabé P., Gonné B., Ngana F. 2009. Evolution des pratiques foncières dans les zones de savane en Afrique centrale. *Conférence Savanes africaines en développement : innover pour durer*. Cirad, Garoua, Cameroun, 9-p.
- Sougnabé P., Hassan A. M. 2017. Impacts de la secte Boko Haram sur les éleveurs dans la région du lac Tchad. *Kawtal Plateforme sous-régionale des Organisations d'éleveurs de l'Afrique Centrale, N'Djamena, Tchad*.
- Starns W. W. 1974. Land tenure among the rural Hausa. *LTC Papers*. 1014, Land Tenure Center, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Taillandier P., Gaudou B., Grignard A., Quang Nghi H., Marilleau N., Caillou P., Philippon D., Drogoul, A. 2018. Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *Geoinformatica*. <https://doi.org/10.1007/s10707-018-00339-6>
- Thébaud B., Batterbury S. 2001. Sahel pastoralists: opportunism, struggle, conflict and negotiation. A case study from eastern Niger. *Global Environmental Change* 11, 69–78.
- Thiriou S., Kant J.-D. 2008. Using associative networks to represent adopters' beliefs in a multi-agent model of innovation diffusion. *Advs. Complex Syst.* 11, 261–272.
- Tiffen M. 1999. Law, power and politics in Niger: Land struggles and the Rural Code. *Africa: The Journal of the International African Institute* 69.
- Tiffen M. 2001. Profile of demographic change in the Kano-Maradi region, 1960-2000. *Dryland Research*, Crewkerne, UK.
- Tiffen M. 2003a. Agricultural intensification in an urbanizing context: the case of dryland sub-Saharan Africa, *Drylands Research*. Crewkerne.
- Tiffen M. 2003b. Transition in sub-Saharan Africa: agriculture, urbanization and income growth. *World Development* 31, 1343–1366.
- Tillon G. 1966. *Le harem et les cousins, Essais*. Seuil, Paris, France.
- Todd E. 2011. *L'origine des systèmes familiaux Tome 1 : l'Eurasie*. Gallimard, Paris, France.
- Tresset A., Vigne J.-D. 2011. Last hunter-gatherers and first farmers of Europe. *C.R.Biologies* 334, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.12.010>
- Tritsch I., Gond V., Oszwald J., Davy D., Grenand P. 2012. Dynamiques territoriales des Amérindiens Wayāpi et Teko du moyen Oyapock, Camopi, Guyane française. *Bois et Forêts des Tropiques*.
- Valdez F. 2018. *Primeras Sociedades de la Alta Amazonía: La Cultura Mayo Chinchipe-Marañón*. IRD Éditions.
- Valette P. 2011. Changements environnementaux et adaptation des sociétés dans la moyenne vallée de la Garonne (18ème siècle à aujourd'hui). *Sud-Ouest Européen* 32, 35–51.
- Van der Veen M. 2010. Agricultural innovation : invention and adoption or change and adaptation ? *World Archaeology* 42, 1–12. <https://doi.org/10.1080/00438240903429649>

- Van Vliet N., Milner-Gulland E.J., Bousquet F., Saqalli M., Nasi R. 2010. Effect of small-scale heterogeneity of prey and hunter distributions on the Sustainability of bushmeat hunting. *Conservation Biology* 24, 1327–1337. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01484.x>
- Verhagen H., Smit R. 2003. Multi-agent system as simulation tools for social theory testing. *ICCSSS* 1–9.
- Verhagen P., Whitley T. G. 2012. Integrating archaeological theory and predictive modeling: a live report from the scene. *J Archaeol Method Theory* 19, 49–100.
- Voinov A., Bousquet F. 2010. Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling & Software* 25, 1268–1281.
- Watts M.J. 2013. *Silent violence: Food, famine, and peasantry in northern Nigeria*. University of Georgia Press.
- Weber M. 1905. *L'Ethique protestante et l'esprit du capitalisme*. Traduction Agora, Paris, France.
- White D. R. 1999. Controlled Simulation of Marriage Systems. *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*. 2, 3.
- Willis K. J., Bennett K. D. 1994. The Neolithic transition - fact or fiction? Palaeoecological evidence from the Balkans. *The Holocene* 4, 330.
- Wirtz K. W., Lemmen C. 2003. A global dynamic model for the Neolithic transition. *Climatic Change* 59, 333–367.
- Ye M., Hill M. C. 2017. Global sensitivity analysis for uncertain parameters, models and scenarios, in: Petropoulos G., Srivastava P. K. (Eds.), *Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling*. pp. 177–210.