



HAL
open science

Analyse des dynamiques des agroécosystèmes par modélisation spatialisée et utilisation d'images satellitaires, Cas d'étude de l'ouest du Burkina Faso.

Camille Jahel

► **To cite this version:**

Camille Jahel. Analyse des dynamiques des agroécosystèmes par modélisation spatialisée et utilisation d'images satellitaires, Cas d'étude de l'ouest du Burkina Faso.. Géographie. AgroParisTech, 2016. Français. NNT : 2016AGPT0059 . tel-04244915

HAL Id: tel-04244915

<https://pastel.hal.science/tel-04244915>

Submitted on 16 Oct 2023

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.

Doctorat AgroParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech)

Présentée et soutenue publiquement par

Camille JAHEL

le 7 Décembre 2016

Analyse des dynamiques des agroécosystèmes par modélisation spatialisée et utilisation d'images satellitaires, *Cas d'étude de l'ouest du Burkina Faso*

Directrice de thèse : **Agnès BÉGUÉ**

Co-encadrement de la thèse : **Danny LO SEEN et Christian BARON**

Jury

M. Thomas HOUET, Chargé de recherche (HDR), CNRS, Rennes
Mme. Delphine LEENHARDT, Directrice de recherche, INRA, Toulouse
Mme. Sylvie LARDON, Directrice de recherche, INRA, Clermont-Ferrand
M. Jacques WERY, Professeur, Montpellier SupAgro, Montpellier
Mme. Agnès BÉGUÉ, Chargé de recherche (HDR), CIRAD, Montpellier
M. Danny LO SEEN, Chargé de recherche (PhD), CIRAD, Montpellier
M. Christian BARON, Chargé de recherche, CIRAD, Montpellier

Rapporteur
Rapporteuse
Examinatrice
Examineur, président du jury
Directrice de thèse
Co-encadrant de thèse
Invité

Thèse effectuée au laboratoire :

CIRAD - Département "Environnements et Sociétés"

UMR TETIS AgroParisTech/CIRAD/IRSTEA

Maison de la Télédétection

TA C-91 / MTD

500 Rue J.F. Breton

34093 Montpellier cedex 5

France

Remerciements

Si sur le papier je suis seule auteure de cette thèse, il y a, dans l'ombre, une armada de personnes qui ont œuvré avec moi à faire connaître au monde entier les bienfaits de la modélisation spatiale.

Et bien sûr, en tête, l'équipe de choc qui m'a encadrée durant cette thèse. Difficile de trouver mieux comme directeur de thèse que Danny Lo Seen, sur le plan scientifique comme humain : toujours à l'écoute, attentionné, disponible, toujours de bon conseil, toujours juste, scientifiquement génial (en tant que leader du fan club d'Ocelet, je sais de quoi je parle). Capable d'un art inégalé pour transformer erreurs, échecs ou critiques en éléments positifs. Merci Danny (et longue vie à Ocelet)! Merci aussi à Agnès Bégué qui a survolé cette thèse d'une aile bienveillante, me faisant confiance en me laissant beaucoup d'autonomie, mais prête à intervenir dès qu'une question se posait. Merci pour ses conseils avisés et ses relectures minutieuses ; avec toujours cette incroyable bonne humeur et cette gentillesse qui ont rendu mon intégration dans l'équipe si facile. Enfin, un grand merci à Christian Baron qui a pimanté ces trois années de son humour à toute épreuve, sans perdre de vue pour autant son rôle d'encadrant, toujours extrêmement concerné par cette thèse, et à l'origine de plusieurs idées originales. Je n'oublie pas cette mémorable première mission au Burkina en duo avec le « rasta au sang chaud »!

C'est aussi toute l'équipe de TETIS que je voudrais remercier, tout particulièrement Jean-Philippe Tonneau, qui s'est intéressé de près à cette thèse. Merci pour ces séances de coaching avant les présentations, pour cette implication et ce soutien, et surtout pour cet accueil chaleureux au sein du labo. Ma reconnaissance va également à Xavier Augusseau, qui, malgré sa surcharge de travail, s'est beaucoup impliqué dans cette thèse. Merci pour ses conseils et avis, ses relectures et son soutien. Un grand merci à Mathieu Castet pour son aide précieuse sur Ocelet, ses nombreux « débuggages » providentiels et sa patience infinie face à mes balbutiements en code. Merci aussi à Annie Huguet pour avoir assuré (avec quelle implication !) tout le fonctionnement administratif de la thèse. Je salue mes supers co-bureaux, Loulou du 112, Béa et Marc qui sont par la même occasion devenus des amis. Merci enfin aux autres membres de TETIS, toujours présents aux présentations et doctoriales, et qui tous ensemble sont responsables de la super ambiance qui règne dans ce labo.

Un grand merci aux chercheurs extérieurs à TETIS qui se sont impliqués dans ce travail, Eric Vall, Georges Serpantié et Michel Havard. Je pense particulièrement à Sébastien Caillault que j'ai retrouvé sur le terrain, et qui m'a beaucoup aidée pour la conduite d'entretiens en me faisant découvrir un autre angle d'analyse des dynamiques de la zone.

Merci, bien sûr, aux rapporteurs de cette thèse, Thomas Houet et Delphine Leenhardt, pour leur lecture détaillée du manuscrit et leurs commentaires constructifs, ainsi qu'aux autres membres du jury, Jacques Wery et Sylvie Lardon pour les points qu'ils ont soulevés, qui m'ont permis d'entamer le difficile processus de prise de recul par rapport à ce travail. Avant la soutenance finale, les réunions de suivi de comité ont permis, elles aussi, de questionner cette thèse et de m'aiguiller pour choisir les bonnes options. Merci aux membres de ces comités, Christian Gary, Sébastien Caillault et Damien Arvor.

Merci aux trois stagiaires qui ont participé à cette thèse, Alejandro Zermeno, Stella Guillemot et Gerald Nana.

Je remercie le CIRDES pour m'avoir accueillie à Bobo et prêté la moto et la voiture. Merci mille fois à Patrice Kouakou pour m'avoir hébergée chez lui pendant un mois. Une pensée reconnaissante à Medina Karambiri pour m'avoir logée à Koumbia, traduit les premiers entretiens tests, et surtout pour ces longues discussions post-entretiens. Toute ma gratitude à Abou pour m'avoir conduite dans les villages et accompagnée dans les coins les plus reculés de la zone, sortie des embourbements, et pour être accouru à la rescousse lors des moments difficiles! Je ne suis pas prête d'oublier sa bonne humeur, ses grands discours et son humour permanent, le tout sur fond sonore de Tiken Jah ! Enfin, merci à Kalifa Coulibaly pour les longs échanges concernant les conditions de vie et de travail dramatiques que connaissent la majorité des paysans du Burkina et pour sa volonté de changer les choses, qui ont été pour moi une source importante de motivation.

Un énorme merci à tous les agriculteurs m'ayant accordé du temps et accepté de partager avec moi une partie de leur quotidien, pour leur générosité, leur gentillesse et leur disponibilité. Merci aussi à mes nombreux traducteurs, Michel, Moussa, Romaric, Dofini et Adama.

Enfin, je dois une fière chandelle à l'armée de mes relecteurs, que ce soit pour les articles en anglais ou pour ce manuscrit de thèse, merci à Cécile, Jean-Baptiste, Béa, Louise, Lénaïc, Anaïs, Noémie, Joëlle, Martin et Bertrand.

Et pour finir, je salue bien bas tous les potes qui m'ont permis de me sortir cette thèse de la tête l'instant d'une bière au Triskell ou d'une rando... à commencer par Thomas, Leandro et Bobby pour ce mémorable été 2014, et son magnifique détour par chez Patrick dans les Causses (merci Bobby) ; Martin et Paul pour les barbeucs dans le jardin, les randos et les innombrables soirées ; les colocs du Burkina, Agnès, Ben, Nora et alex ; Anaïs la fidèle coloc du Nica ; Béa la fière andalouse ; Dorothée, Vincent et les parigots qui ont daigné descendre quelques week-ends dans le Sud pour s'imprégner de l'esprit de la garrigue ... Merci les amis!

Sommaire

Introduction 2

Chapitre I : Contexte et problématique de la thèse..... 6

1. Systèmes d’alerte précoce et suivi des dynamiques agraires en Afrique.....6
2. Le paysage agricole, source d’indicateurs clés pour les systèmes d’alerte précoce... 8
3. Les outils et méthodes utilisés par les systèmes d’alerte précoce au service de l’étude des paysages agricoles 13
4. Objectifs, questions de recherche et organisation de la thèse.....23

Chapitre II : Approche et données..... 28

1. L’approche systémique pour l’étude des paysages agricoles..... 28
2. Présentation de la zone d’étude et données utilisées32

Chapitre III : De la parcelle à la région, modélisation spatialisée et multiscalaire des dynamiques des agroécosystèmes..... 46

1. Idée générale : utilisation des graphes d’interaction entre échelles47
2. Résumé de l’article : *modélisation spatiale des dynamiques des agroécosystèmes à travers plusieurs échelles : un cas d’étude dans la région cotonnière de l’ouest du Burkina Faso* 51
3. Article 1 : *Spatial modelling of agro-ecosystem dynamics across scales: A case in the cotton region of West-Burkina Faso*.....58

Chapitre IV : Vers une amélioration de la compréhension des dynamiques passées et futures de l’agroécosystème de la province du Tuy 82

1. Résumé de l’article 2 : *Analyser les futurs plausibles sur la base des processus passés d’évolution des paysages, à l’ouest du Burkina Faso* 84
2. Article 2: *Analyzing plausible futures from past patterns of land change in West Burkina Faso* 91

3. Article 3 : <i>Modélisation des processus de décision des assolements : quelle marge de manœuvre pour les agriculteurs du Burkina Faso ?</i>	113
---	-----

Chapitre V : Vers une amélioration du suivi des changements des agroécosystèmes, par croisement entre modélisation spatiale et information satellitaire**136**

1. Rappel sur les méthodes d'assimilation de données de télédétection dans les modèles de culture	137
---	-----

2. Article 4 : <i>Détecter les processus de changement des paysages dans les images, le lien entre modélisation spatiale et télédétection.</i>	142
--	-----

Conclusion**162**

Table des matières**172**

Liste des figures**172**

Liste des tableaux**179**

Références bibliographiques**180**

Annexes.....**162**

Introduction



Introduction

Sécurité alimentaire et changements agraires en Afrique de l'Ouest

Aujourd'hui, 795 millions de personnes dans le monde souffrent de sous-alimentation (FAO, 2015a). Un quart d'entre eux vit sur le continent Africain. Classé 6^{ème} pays le moins développé au monde en 2015 (PNUD, 2015), le Burkina Faso est l'un des pays d'Afrique les plus concernés par les problèmes d'insécurité alimentaire. Ainsi, environ 20 % de sa population était en situation effective d'« insécurité alimentaire » en 2012 et 43 % considérée comme « limite » au regard de ce critère : c'est à dire en situation de subvenir tout juste à ses besoins dans ce domaine, au détriment des dépenses en santé et en éducation (FAO, 2013). Au Burkina comme dans les autres pays d'Afrique de l'Ouest, l'insécurité alimentaire sévit principalement au sein des populations rurales agricoles, qui disposent généralement de très peu de moyens de production (terre ou capital) qui permettraient de produire plus pour couvrir les besoins de leur famille. Ainsi, 72 % des exploitations agricoles burkinabées ont moins de cinq hectares et 60% ne possèdent qu'une charrue et des bœufs de trait, la traction motorisée n'étant accessible qu'à 0,2% des exploitations. A cela s'ajoute un très faible accès au crédit (seulement 8% des agriculteurs), limitant l'accès aux intrants et à l'acquisition d'équipements performants (FAO, 2013). Autant de facteurs empêchent ces ménages de capitaliser et les maintiennent dans une spirale de pauvreté.

Pourtant, l'Afrique de l'Ouest a connu une nette augmentation de sa production ces trente dernières années, les quantités de céréales ayant plus que triplé entre 1970 et 2010 (FAO, 2009b). Cette augmentation est liée à l'effet cumulé de l'extension des surfaces cultivées et de l'augmentation des rendements, notamment dus à l'introduction de nouveaux outils agricoles comme la traction attelée, l'utilisation de nouvelles variétés ou d'intrants chimiques. Mais si les rendements ont connu une augmentation les vingt premières années, ces nouvelles technologies ont engendré une surexploitation des terres avec pour conséquences un appauvrissement des sols, une recrudescence d'adventices et des attaques répétitives de ravageurs à l'origine d'une stagnation voire d'une baisse des productions à l'hectare.

Sur la même période, la population d'Afrique de l'Ouest a connu une croissance inédite, multipliée par deux dans les zones rurales et par trois dans les villes. La vitesse de croissance comparée entre production agricole et population a donc été sensiblement la même ne permettant pas de diminuer suffisamment le nombre de personnes en situation d'insécurité alimentaire, passé de 44,6 millions en 1990 à 31,5 millions aujourd'hui (FAO 2015b). Il existe donc aujourd'hui un réel besoin d'augmenter les productions agricoles en Afrique de l'Ouest ou du moins d'en faciliter l'accès aux populations les plus pauvres. La situation n'est pas en voie d'amélioration puisque la région s'apprête à doubler sa population dans les 30 prochaines années (FAO, 2009b), ce qui laisse à prévoir d'importants questionnements quant aux moyens

de nourrir cette population en croissance. La question de la sécurité alimentaire à venir pour plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest est donc cruciale.

Les agricultures d'Afrique de l'Ouest s'apprêtent par ailleurs à faire face au défi du changement climatique. Les pays aux climats soudano-sahéliens ou sahéliens sont les plus touchés. La forte variabilité climatique y engendre une disparité et une incertitude importante dans les rendements. La dérégulation des pluies, l'augmentation du nombre et de l'amplitude des sécheresses et des inondations, quand ce n'est pas la désertification des terres sahéliennes, perturbent chaque année les saisons culturales, et demandent aux agriculteurs de développer des stratégies adaptatives en un temps record. Majoritairement pluviale, l'agriculture des pays d'Afrique soudanienne ne dispose pas d'aménagements pour l'irrigation qui permettraient d'atténuer les effets de certains événements climatiques, rendant les agriculteurs vulnérables face à ces aléas.

Ces cinquante dernières années ont donc été marquées par de rapides mutations des territoires ruraux d'Afrique de l'Ouest, principalement visibles dans l'avancée du domaine cultivé au détriment de la végétation naturelle et des zones de parcours et de pâturage. Parallèlement à cela, les techniques culturales ont évolué, et de nouvelles espèces et variétés ont été implantées. Les cultures de rente ont ainsi connu un spectaculaire essor, comme l'arachide au Sénégal, le cacao en Côte d'Ivoire, le coton au Mali et Burkina, soutenues par des politiques d'exportation. Acteurs principaux de ce monde en transition, les agriculteurs sont les premières victimes du manque alimentaire, mais sont aussi les plus exposés aux aléas climatiques et les moins sécurisés foncièrement et financièrement. Ce sont pourtant eux qui vont devoir relever les défis de demain, garantir la sécurité alimentaire pour une population croissante dans un contexte de changement climatique, en produisant plus et de manière durable.

Complexité du suivi de ces changements

Dans ce contexte, un suivi de l'agriculture est indispensable pour pouvoir prévoir les rendements et les productions, accompagner les transformations avec des politiques adaptées, soutenir les agriculteurs et désamorcer les possibles crises alimentaires. Cette anticipation des productions à venir ne peut se faire qu'avec une compréhension fine des facteurs influençant aujourd'hui les dynamiques agraires et les rendements (Licker, 2010).

C'est dans ce but que sont mis en place les systèmes d'alerte précoce. Ce sont des programmes de surveillance ayant pour but d'anticiper et d'endiguer l'insécurité alimentaire par l'analyse des risques de catastrophe. Leur objectif est double :

- prévoir les productions agricoles au cours de la saison à venir pour anticiper les possibles manques,
- sur le plus long terme, suivre les dynamiques de changement des zones agricoles en faisant des analyses rétrospectives et prospectives en soutien aux politiques publiques.

La plus grande partie du suivi et des prévisions est réalisée en croisant des données issues de la télédétection et des simulations de modèles de culture. Alors que les images satellitaires fournissent des informations concernant le climat et l'état et l'évolution des paysages (et

notamment de la végétation), les modèles permettent de simuler des scénarios prospectifs à partir des images. Cependant, les images qui couvrent une large zone avec une grande fréquence temporelle sont souvent de moyenne voire basse résolution, ce qui ne permet pas de distinguer le parcellaire lorsque ce dernier est petit et fragmenté (Bégué et al., 2016). Par ailleurs, le fait que les modèles soient le plus souvent dédiés à une échelle spécifique, rend leur application difficile sur l'ensemble d'un territoire (National Research Council, 2013, Leenhardt et al., 2010 ; Faivre et al., 2004).

La mise en œuvre des méthodes développées par les systèmes d'alerte précoce se heurte donc à plusieurs verrous techniques qu'il est nécessaire de débloquent pour améliorer les suivis multiscalaires des mutations agraires.

Présentation générale de la thèse et organisation du manuscrit

Cette thèse traite de l'étude des changements agraires et de leurs mécanismes. Si les problématiques abordées concernent un grand nombre de pays Africains, la présente étude se concentre sur la province du Tuy, située à l'ouest du Burkina Faso, et constitue ainsi une zone pilote. Elle se propose d'explorer de nouvelles pistes méthodologiques basées à la fois sur de la modélisation et de la télédétection, pour réaliser une analyse rétrospective et prospective des dynamiques agraires de la zone d'étude.

La thèse est rattachée et financée par le projet FP7 SIGMA. Ce projet a été monté en appui à GEOGLAM (Global Agricultural Geo-monitoring) et vise à développer des méthodes et indicateurs innovants de suivi et d'évaluation de l'agriculture dans le but de développer une « agriculture durable ». Elle se positionne dans l'axe « évaluation de la productivité agricole ».

Le manuscrit se divise en 5 chapitres. Le premier présente le contexte de la thèse, ses objectifs et questions de recherches. Le second chapitre concerne le cadre d'analyse choisi et décrit les problématiques de la zone d'étude. Les chapitres suivants présentent les résultats obtenus, valorisés sous forme d'articles : Le chapitre 3 présente le modèle multiscalair développé et discute de sa capacité à croiser les échelles, le chapitre 4 contient deux articles présentant l'analyse prospective des dynamiques agraires de la zone d'étude réalisée à l'aide du modèle ; enfin, le dernier chapitre concerne les liens pouvant être faits entre modèles de dynamiques paysagères et données satellitaires, à savoir l'utilisation des modèles pour améliorer l'analyse des informations issues des images satellitaires et le l'assimilation de données de télédétection dans le modèle.

Chapitre I :
Contexte et problématique
de la thèse



Chapitre I :

Contexte et problématique de la thèse

Ce chapitre présente les éléments de contexte qui conduisent à la formulation des objectifs de thèse et questions de recherche. Une présentation du fonctionnement des systèmes d'alerte précoce dans le contexte général de diminution de l'insécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest, sera tout d'abord établie. Deux axes de travail des systèmes d'alerte précoce sont retenus pour la thèse :

- le suivi et la prévision saisonnière des productions agricoles,
- le suivi prospectif à plus long terme des dynamiques agraires.

Le paysage agricole, objet d'étude central pour chacun de ces axes, sera ensuite défini ainsi que les facteurs qui sont à l'origine de ses évolutions. L'accent sera mis sur l'importance, dans le cadre des systèmes d'alerte précoce, d'une approche multiscalaire des paysages sur une étendue régionale.

Enfin, les outils utilisés par les systèmes d'alerte précoce au service du suivi prospectif des indicateurs paysagers, à savoir l'utilisation conjointe de la télédétection et des modèles, seront décrits, et certains aspects restant à améliorer seront identifiés.

Cette présentation du contexte et des enjeux aboutira dans une dernière partie à l'explicitation des objectifs, questions de recherche et à la présentation de la structure de la thèse.

1. Systèmes d'alerte précoce et suivi des dynamiques agraires en Afrique

De par sa forte variabilité climatique, la résurgence d'épisodes de sécheresses ou d'inondations, l'impact des ravageurs sur les cultures, l'instabilité économique et le grand nombre de ménages dont le revenu se situe en dessous du seuil de pauvreté, l'Afrique subsaharienne est soumise à de multiples risques pouvant engendrer des crises humaines de grande ampleur. La forte répétitivité de ces événements maintient les populations en situation de vulnérabilité (NEPAD, 2013).

Dans les années 70-80, suite à l'occurrence de crises alimentaires particulièrement importantes (notamment au Soudan et en Ethiopie), des programmes appelés systèmes d'alerte précoce ont été mis en place sur tout le continent. Ils ont pour but d'anticiper et d'endiguer l'insécurité alimentaire par l'analyse des risques de catastrophe. Ces systèmes sont construits autour de 4 axes d'action (IFRC. 2012, FAO 2014, Cowan et al., 2014):

- **La connaissance des risques, ou le suivi des évolutions des dynamiques agraires, pouvant mener à plus long terme à des crises alimentaires :**

Cela consiste à recueillir et analyser des données couvrant une longue période pour identifier les zones géographiques, les populations vulnérables et les différents types de risques. Le but est de comprendre les tendances et dynamiques passées pour anticiper les évolutions à venir.

- **Le suivi technique et l’alerte pour les risques identifiés :**

Il s’agit de suivre l’évolution en temps réel d’indicateurs appropriés pour établir des prévisions d’évolution à court terme et lancer l’alerte en cas de déviation de ces indicateurs par rapport à la normale. Pour l’exemple du suivi des campagnes agricoles, les systèmes d’alerte précoce récoltent, analysent et diffusent des informations concernant les productions agricoles et leurs prévisions pour la saison en cours, en fonction des prévisions climatiques.

- **La capacité de réponse :**

Cela concerne le développement d’infrastructures et/ou de programmes d’actions à réaliser en cas d’alerte.

- **Les avis d’alerte :**

Cela concerne le développement de techniques et méthodes de diffusion des alertes afin de toucher le maximum de personnes.

Cette thèse s’intéresse aux deux premières composantes des systèmes d’alerte précoce, à savoir la connaissance des risques et le suivi technique pour les risques identifiés.

En Afrique de l’Ouest, les risques suivis par les systèmes d’alerte précoce concernent essentiellement ceux qui menacent la production vivrière. Une grande partie du travail des systèmes d’alerte précoce réside dans l’élaboration de bilans céréaliers nationaux pour évaluer d’éventuels besoins en aide alimentaire. Mais d’autres facteurs influençant la sécurité alimentaire sont souvent pris en compte, les données utilisées concernant le suivi des productions agricoles, l’observation des évolutions des marchés, ou encore les questions d’accessibilité aux denrées agricoles (Vintrou, 2012a).

Plusieurs systèmes existent, nous prendrons ici l’exemple de trois systèmes d’alerte précoce œuvrant en Afrique de l’Ouest :

Le FEWS-NET (Famine Early Warning System – NETwork) travaille dans 36 pays dont 11 en Afrique de l’Ouest en publiant des rapports prospectifs sur la sécurité alimentaire dans chacun de ces pays. Sa démarche se décompose en 3 étapes :

- un diagnostic des dynamiques influençant la sécurité alimentaire (étude des marchés, de l’agro-climatologie, du fonctionnement économique et social des ménages, des aspects nutritionnels),
- la collecte permanente d’informations pour le suivi de la situation alimentaire,
- l’évaluation de prévisions de sécurité alimentaire à l’aide de scénarios prospectifs et le conseil aux décideurs.

Le GIEWS (The Global Information and Early Warning System on Food and Agriculture) travaille sur l'ensemble de la planète à différentes échelles. Il fournit des informations régulières sur les cultures vivrières et la sécurité alimentaire. Ses axes de travail sont la production agricole (suivi du développement des cultures), les stocks alimentaires, le commerce et les marchés des denrées alimentaires ainsi que l'aide alimentaire mondiale.

Enfin, l'AGRHYMET intervient essentiellement en Afrique de l'Ouest en publiant mensuellement des bulletins portant sur la disponibilité alimentaire. Il utilise pour cela des méthodes de suivi des cultures au travers de suivis météorologiques, hydrologiques et agronomiques en travaillant à partir d'observations du sol, d'enquêtes terrain, et de données satellitaires (Traore et al., 2014).

2. Le paysage agricole, source d'indicateurs clés pour les systèmes d'alerte précoce

La majorité des indicateurs suivis (e.g. surfaces en cultures, indices de végétation, état de la végétation) par les systèmes d'alerte précoce sont issus de l'observation des paysages agricoles, ou déduits de la présence de facteurs influençant l'organisation et l'évolution des paysages. C'est pourquoi nous mettons le paysage agricole au cœur de notre étude.

2.1. L'objet d'étude, le paysage agricole

Parmi les nombreuses définitions du paysage nous retiendrons celle qui le décrit comme « une partie d'un pays (ou une portion de l'espace) perceptible à un observateur, où s'inscrit une combinaison de faits (ou d'actions) visibles et invisibles dont nous ne percevons à un moment que le résultat visible » (Deffontaines, 1973). A cette description spatiale s'ajoute une dimension temporelle importante, le paysage étant « une perception momentanée qui révèle les actions présentes ou passées » (Deffontaines, 1973). Les paysages ruraux sont caractérisés par la prédominance de l'activité agricole, qui devient un élément majeur de son organisation (Deffontaines et al, 1995). Plus précisément, c'est l'organisation spatiale et temporelle des parcelles de cultures qui caractérise le paysage agricole (Lazrak 2010).

Un axe d'étude privilégié des paysages agricoles est l'observation de l'occupation et de l'utilisation des sols. L'occupation du sol désigne la couverture physique du sol, qui peut être de différentes natures : forêt, surfaces artificialisées, prairies... (Brown et al 2004, Lecerf 2008). L'utilisation du sol fait, quant à elle, référence à la fonction socio-économique de la surface.

Enfin, nous ajouterons la production du sol comme troisième composante importante des paysages. La production du sol est elle aussi de différentes natures, pouvant consister en un taux de biomasse végétale, un volume de grains, un taux de matière organique, etc. Elle est intrinsèquement liée à l'occupation et l'utilisation du sol. En effet, la manière dont la terre est utilisée va déterminer la valeur de la production générée, et cette dernière est en retour un moteur du changement d'utilisation du sol pour la saison suivante (l'exploitant adapte son

choix d'utilisation du sol pour l'année n en fonction des résultats de production obtenus sur l'année n-1).

L'occupation, l'utilisation et la production du sol sont interdépendants, et il est nécessaire d'aborder ces trois aspects et leurs interactions dans l'analyse holistique des paysages agricoles.

Les systèmes d'alerte précoce s'intéressent aux paysages pour repérer et analyser les signes indicateurs d'une tendance concernant les productions. Le suivi prospectif de l'occupation, de l'utilisation et de la production des sols est donc central.

2.2. Dynamique des paysages agricoles et changements d'utilisation, de couverture et de production des sols

Les paysages sont soumis à des facteurs externes, variables au cours du temps, qui induisent des réactions entre certains de leurs éléments menant à une modification de leur organisation. Ainsi, la couverture, l'utilisation et la production du sol sont amenés à évoluer. Ce sont ces évolutions que suivent les systèmes d'alerte précoce pour prévenir les risques. La compréhension de l'impact d'un facteur externe sur les paysages est donc un axe privilégié des systèmes d'alerte précoce, puisqu'elle permettra d'anticiper la réaction des paysages et de leurs composantes en cas d'aléas climatiques, de conflits, de variations sur les marchés, etc.

Deux types de changements d'occupation et d'utilisation du sol se distinguent : les conversions désignent les changements d'une classe d'occupation du sol vers une autre (forêt vers cultures par exemple), alors que les modifications concernent les changements au sein d'une même classe (une culture de maïs remplacée par du coton par exemple). (Baulies et al, 1997 ; Stott et al., 1998 ; Lecerf, 2008). À l'échelle globale, les conversions les plus importantes observées ont été un recul des zones de forêts au profit d'une avancée des zones de cultures et de pâturages (Lambin et Meyfroidt, 2011).

Plusieurs études ont contribué à identifier les facteurs provoquant des évolutions paysagères (Antrop, 2005 ; Lambin et al., 2001 ; Geist et Lambin, 2002 ; Bürgi et Russell, 2001). Ils se partagent entre facteurs naturels et anthropiques (fig.1).

Les facteurs naturels sont majoritairement de nature climatique, soit avec des événements ponctuels (inondations, sécheresses, cyclones...), soit lors d'évolutions à plus long terme (augmentation progressive des températures, diminution de la longueur des saisons des pluies). Ils peuvent aussi être de nature écologique et consister en des changements de sols, d'espèces animales ou végétales.

Les facteurs anthropiques sont variés et sont en général la source des changements majeurs. Geist et Lambin (2002) les classent en 5 catégories :

- Les facteurs économiques : les variations des prix sur le marché et l'accès au crédit induisent des prises de décision de l'exploitant pour ce qui concerne la gestion et l'utilisation de l'environnement.

- Les facteurs politiques et institutionnels : ce sont les réglementations et pratiques politiques, juridiques et économiques. Quelques exemples sont le droit de propriété, les politiques environnementales, les politiques d'aménagement des territoires ou encore les politiques de régulation des marchés.
- Les facteurs technologiques : les innovations technologiques facilitent l'exploitation des ressources naturelles et de ce fait, agissent directement sur l'évolution du paysage. Par exemple l'introduction du tracteur qui permet d'étendre plus rapidement les zones de culture. Elles ont aussi un impact direct sur les marchés: l'exploitation de la forêt, outre qu'elle libère de l'espace pour augmenter les surfaces cultivées provoque aussi un afflux de bois sur les marchés, avec pour conséquence une baisse de son prix.
- Les facteurs culturels : ils résultent de l'histoire d'une population, de ses valeurs et croyances et des comportements des individus.
- Les facteurs démographiques : ce sont les mouvements migratoires, l'accroissement naturel et la répartition spatiale des populations. Ils ont longtemps été considérés comme le moteur essentiel de l'exploitation du milieu naturel par l'homme (Malthus, 1798).

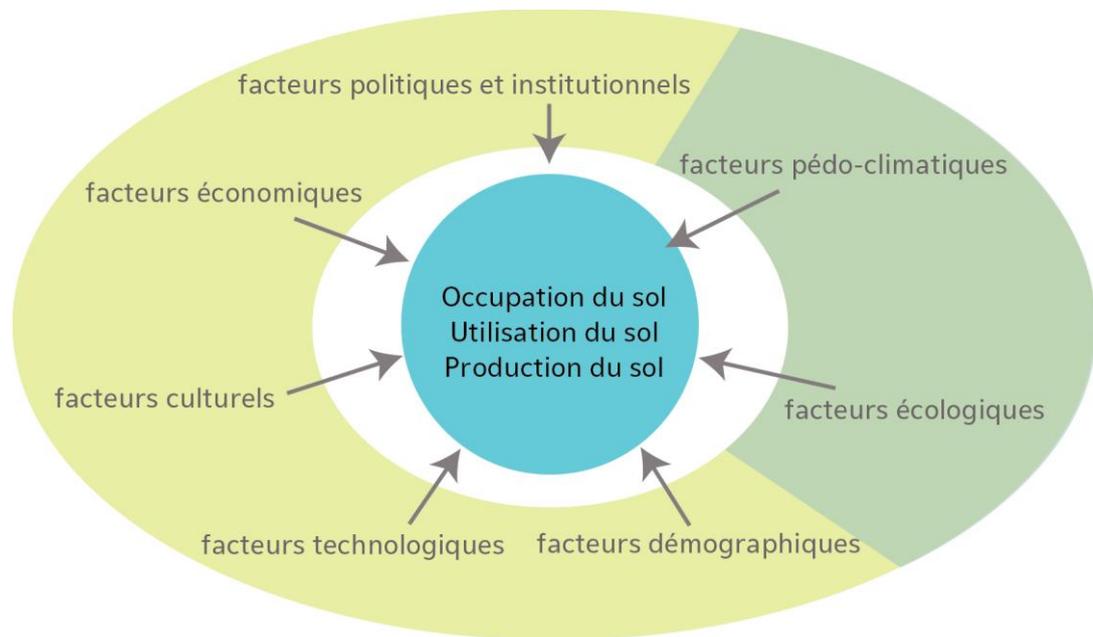


Figure 1: Facteurs à l'origine des évolutions des paysages.

Les changements de paysages résultent d'une combinaison de ces facteurs, qui souvent sont inter-corrélés, ce qui rend l'étude des dynamiques paysagères complexe. Lambin et Meyfroidt (2011) évoquent des effets « rétroactifs », « de rémittence », « en cascade » et « de déplacement », pour illustrer la complexité des liens entre les facteurs et leurs effets sur les paysages.

2.3. Quelle étendue et quelles échelles pour l'étude des paysages agricoles ?

Gibson et Ostrom (1999) désignent par échelle : les « dimensions spatiales, temporelles, quantitatives ou analytiques utilisées pour mesurer et étudier des phénomènes ». Il s'agit ici de définir l'unité d'analyse la plus pertinente pour appréhender une variable étudiée. La notion d'étendue évoque quant à elle « la taille des dimensions spatiales, temporelles, quantitative ou analytique de l'échelle » (Gibson et Ostrom, 1999). Il s'agit ici de dessiner les frontières de l'étude.

L'étendue crée un cadre analytique en délimitant dans le temps et l'espace le paysage étudié. Les diverses échelles des éléments étudiés varient au sein de cette étendue.

La notion de niveau d'organisation est proche de celle d'échelle, et fait référence à l'aspect organisationnel des variables étudiées, sans résolution ni étendue claires (on parle par exemple du niveau d'organisation de l'exploitation agricole).

2.3.1. L'intérêt de l'étendue régionale dans le cadre des systèmes d'alerte précoce

La plupart des systèmes d'alerte précoce travaillent sur des zones dont l'étendue est régionale, nationale voire multinationale. Si les systèmes d'alerte précoce sont destinés in fine aux populations, ils s'adressent aussi à d'autres intermédiaires, éclairant les prises de décisions politiques ou d'interventions en cas de crise. Dans un tel contexte, une étendue locale de la zone d'étude (un village ou groupe de villages) serait trop restreinte et inadéquate pour mener une politique cohérente et efficace de prévention d'insécurité alimentaire.

L'étendue régionale est une notion floue, qui se situe à mi-chemin entre le local et le global et dont la justification consiste en une certaine cohérence par rapport à un objectif d'étude. Une région peut tout aussi bien être une partie d'un territoire qu'une partie d'un continent. La région est néanmoins un espace défini selon certains critères, qui peuvent être climatiques, culturels, historiques, politiques, naturels, etc. (De Jonge et al., 1994 ; Gotelli et al., 2002 ; Lecerf, 2008 ; O'Neil et al., 1996). Dans le cadre des systèmes d'alerte précoce, il est judicieux de définir la région d'étude par rapport à des critères administratifs et de prise de décision, comme les provinces ou les départements pour le cas du Burkina.

2.3.2. Importance d'une approche multiscalaire

Les systèmes d'alerte précoce s'intéressent aux dynamiques de changements d'utilisation, d'occupation et de production des sols d'un paysage agricole.

L'échelle d'étude optimale, pour ce qui concerne les cultures, est celle de la parcelle ou du groupe de parcelles, puisqu'il est possible d'y observer les types de cultures et leurs successions ainsi que les pratiques culturales. Mais étudier les systèmes de culture à l'échelle de la parcelle à l'intérieur d'une zone dont l'étendue atteint le millier de km² est difficile et demande d'acquérir un nombre élevé de données, souvent non accessibles (Leenhardt et al., 2010).

L'étude des systèmes de culture à l'échelle régionale pâtit comparativement d'une perte d'information, les systèmes de culture étant réduits à n'être caractérisés que par les espèces cultivées, les pratiques culturelles étant indétectables à cette échelle. En revanche, l'usage de cette échelle fournit une vision dynamique de la situation puisqu'elle permet de percevoir la répartition spatiale des cultures et la relation entre les pratiques agricoles et les ressources naturelles (Jouve, 2006).

Cet exemple montre que pour un même objet d'étude, une approche combinant plusieurs échelles est nécessaire.

De plus, les dynamiques de changement des paysages résultent de plusieurs types de facteurs énoncés plus haut, qui eux même s'expriment à des échelles différentes. Ainsi, les facteurs climatiques interviennent en général à des échelles régionales, les facteurs économiques comme l'évolution des marchés se situent à l'échelle globale alors que les facteurs culturels concernent le niveau individuel ou du groupe d'individus. Enfin, comme souligné plus haut, l'un des aspects importants de l'étude d'un paysage réside dans le fait que chaque échelle d'observation et d'analyse révèle certaines informations et en occulte d'autres. Une approche multiscalair dans l'appréhension d'un paysage est donc nécessaire pour prendre en compte le maximum d'informations et comprendre l'organisation du paysage. (Veldkam et al., 2001 ; Verburg et al., 2013).

Le problème se pose alors de comment opérer ce changement d'échelle ? Comment étudier à une échelle large (régionale) des objets ou phénomènes majoritairement visibles à fine échelle ou niveau (la parcelle, l'exploitation) ? Gibson et Ostrom (1999) caractérisent ce problème en soulignant le fait qu'agrandir l'échelle spatiale revient à « appliquer les informations tirées de l'analyse à petite échelle à une échelle mésoscopique ». Leenhardt et al. (2010) soulignent le risque de simplifier l'information en voulant la ramener à une plus petite échelle.

.....

BILAN :

Les systèmes d'alerte précoce s'intéressent au suivi des dynamiques de production d'utilisation et d'occupation des sols pour prévenir les risques de crise alimentaire.

Ces changements résultent d'une multitude de facteurs ayant des impacts à toutes les échelles du paysage.

Le suivi doit se faire sur une étendue régionale et tenir compte des mécanismes transcalaires.

.....

3. Les outils et méthodes utilisés par les systèmes d’alerte précoce au service de l’étude des paysages agricoles

Les systèmes d’alerte précoce travaillent beaucoup à partir d’informations issues des images satellitaires, qui sont généralement croisées avec des données climatologiques, socio-économiques et qui interagissent avec des modèles de culture ou de dynamiques paysagères (Brown et al., 2007).

Les données satellitaires permettent de caractériser les paysages et de suivre l’évolution d’indicateurs de végétation. Ces données sont ensuite utilisées via des méthodes de forçage ou d’assimilation dans les modèles de culture, et sont utilisées en entrée de modèles de dynamiques de paysages, ce qui permet de produire des cartes de prévision de l’évolution des cultures ou de l’occupation du sol.

Les deux sous-parties suivantes présentent un état de l’art des travaux en télédétection et des modèles utilisés par les systèmes d’alerte précoce. Une présentation du couplage entre modèles et télédétection est ensuite réalisée, et certains points seront mieux détaillés en première partie du chapitre V.

3.1. La télédétection comme outil d’observation des évolutions des paysages

3.1.1. La télédétection dans les systèmes d’alerte précoce

La télédétection est un outil puissant au service de l’étude des paysages. Par télédétection, on entend « *l’ensemble des techniques qui permettent, par l’acquisition d’images, d’obtenir de l’information sur la surface de la Terre (y compris l’atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l’énergie d’un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l’information qu’il représente, pour ensuite mettre en application cette information* » (CCRS, 2015).

La télédétection est essentielle pour l’alerte précoce, puisqu’elle fournit des données régulières de végétation et à large étendue.

Les capteurs du domaine optique fonctionnent sur plusieurs bandes spectrales dans lesquelles ils enregistrent des informations issues des rayonnements provenant de la scène. Aujourd’hui, une large gamme d’images sont disponibles, dont les résolutions spatiales et temporelles varient selon le capteur utilisé (tab.1). Lorsque la résolution spatiale est moyenne, généralement la couverture est étendue et la répétitivité forte, alors que les images de haute ou très haute résolution spatiale ont une couverture bien plus restreinte et une répétitivité moindre. Le tableau suivant récapitule les différents capteurs majoritairement utilisés pour les applications terrestres et leurs propriétés.

Table 1: Caractéristiques de différents capteurs dans le domaine optique.

	SPOT 5	LANDSAT 7 ETM+	MODIS	PLEIADES	QUICKBIRD
Résolution spatiale	2,5m et 5m (pan) 10-20m	15m (PAN) 30m (S) 90m (IRT)	250-500- 1000 m	0,7m (PAN)	0,61m (PAN) 2,44 m
Répétitivité	26 jrs	16 jrs	1 jr	1 jr	3-7 jrs
Bandes spectrales	5	8	36	4	4
Fauchée	60-120-2200 km	185 km	2330 km	20 km	16,5 km

La télédétection rend possible l'étude des deux dimensions des paysages en permettant d'une part une analyse spatiale via l'observation de la répartition et localisation des objets dans l'image, et d'autre part une analyse temporelle au travers des séries d'images de la même zone, prises depuis un même repère à des moments différents. La comparaison de ces séries temporelles d'images permet de suivre les changements du paysage au fil du temps.

Les systèmes d'alerte précoce privilégient en général les données issues de satellites couvrant à grande fréquence une large zone (MODIS ou LANDSAT), les autres données étant souvent trop localisées et coûteuses. Mais ce type de données satellitaires est de moyenne résolution spatiale et ne permet pas de distinguer le parcellaire lorsque ce dernier est petit et fragmenté. La figure 2 présente les images de la même zone d'étude par trois capteurs de résolution spatiale différentes.

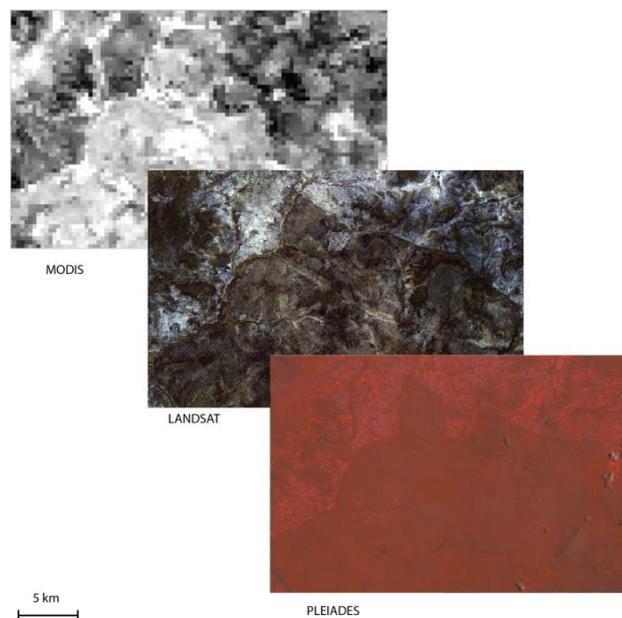


Figure 2: Comparaison des résolutions spatiales des capteurs MODIS, LANDSAT et PLEIADES, pour une même étendue (basée sur l'étendue d'une image PLEIADES)

3.1.2. Difficultés d'utilisation de la télédétection pour l'observation et le suivi des espaces cultivés

La télédétection trouve de nombreuses applications en agronomie. Elle est utilisée pour estimer la biomasse et les rendements, la vigueur et le développement phénologique de la végétation ou la superficie des cultures donnant ensuite lieu à une cartographie des terres cultivées ou encore à une cartographie des changements d'occupation du sol. (Atzeberg 2013).

Il est possible de cartographier précisément l'occupation du sol à l'aide d'images à haute ou très haute résolution spatiale (par exemple QUICKBIRD, PLEIADES ou SPOT 6 et 7), mais ces images ne permettent pas de couvrir facilement une large surface. Plusieurs travaux ont donc développé des techniques permettant de cartographier des zones plus importantes à partir d'images de moins bonne résolution spatiale mais ayant une fauchée et une répétitivité plus importantes. Quelques exemples sont les travaux de Panigraphy et Sharma (1996) sur la classification des rotations culturales à l'aide de séries temporelles d'images moyenne résolution ; ou encore d'Arvor et al (2011) qui utilisent eux aussi les séries temporelles d'images MODIS pour caractériser les types de changements d'occupation du sol dans la région du Mato Grosso au Brésil, en recherchant des motifs temporels caractéristiques pour chaque type d'objet. Plusieurs études soulignent néanmoins les limites de l'utilisation des images MODIS pour repérer les changements dans les paysages très fragmentés (Lecerf, 2008 ; Soares et al, 2008), et identifie le problème d'échelle (Kuemmerle et al, 2013) qui se pose lorsque l'on essaye de détecter des éléments de petite taille (les parcelles de 1 hectare) à l'intérieur d'un pixel restituant l'information contenue dans une vaste superficie de terrain (environ 6 hectares pour MODIS).

Les travaux d'Elodie Vintrou (2012 (b)) prouvent néanmoins qu'il est possible d'extraire une information fine à partir d'images à faible résolution spatiale. Elle développe en effet une méthode pour caractériser les systèmes de culture à partir d'image MODIS croisées avec des données terrain à l'aide d'une technique d'apprentissage automatique (Random Forest). Elle retrouve ainsi des indices des systèmes de culture dominants sur les images MODIS.

3.2. La modélisation comme outil d'analyse et de prospection des dynamiques des paysages

3.2.1. Aperçu général de la modélisation

On appelle modélisation le « processus par lequel on organise les connaissances portant sur un système donné ». (Ziegler 2000). La modélisation consiste à décrire le système réel sous la forme d'un modèle, soit « une représentation simplifiée de la réalité en vue de la comprendre et de la faire comprendre » (Haggett via Sanders 2001). Les modèles peuvent servir à rendre compte des changements ou encore à rechercher la causalité des processus observés (Sanders 2001). Ils sont aussi souvent utilisés pour faire des prévisions et simuler différents scénarios. Ces simulations sont la plupart du temps établies à partir d'une plateforme informatique, dans laquelle le modèle conceptuel est traduit en modèle informatique (Ramat 2005). Les modèles se caractérisent par leur mode d'articulation du temps (continu ou discret), de l'espace (agrégé ou désagrégé) et des états (continus ou discrets). (Gillet 2014).

Dans le cadre du suivi des dynamiques paysagères, l'utilisation de la modélisation est double : elle va permettre d'une part de simuler et prospecter l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols, et d'autre part d'estimer et de prévoir les productions.

Actuellement, la plupart des modèles existants n'intègrent qu'un seul de ces deux aspects, l'utilisation/occupation du sol ou la production du sol, et n'abordent que partiellement l'autre. Ainsi, une panoplie de modèles a été développée pour traiter des dynamiques d'occupation/utilisation des sols ; au regard de la littérature, les productions agricoles n'y sont pas intégrées. En revanche, les dynamiques spatiales sont décrites de plus en plus précisément, et plusieurs niveaux d'organisation sont pris en compte. En parallèle, une autre catégorie de modèles s'intéresse au développement de la plante, et donc à la production du sol, mais ne la remplace que difficilement dans le paysage (Van Ittersum 2013). Ce sont les modèles de culture, très souvent couplés à des modèles d'exploitation bioéconomiques (Janssen et al, 2007).

3.2.2. Les modèles spatiaux de dynamiques paysagères

Il existe une grande variété de modèles pour simuler les dynamiques d'occupation et d'utilisation des sols. Plusieurs études ont contribué à les classer en plusieurs courants (Agarwal et al., 2002 ; Castella and Verburg, 2007 ; Degenne, 2011 ; Ford, 1999 ; Kelly et al., 2013 ; Laniak et al., 2013; Van Ittersum et al., 2008 ; Verburg and Veldkamp, 2001) : i) les descendants (top down), ii) les ascendants (bottom up) et iii) les mixtes.

i) Les approches descendantes

Elles consistent à décrire le système dans sa globalité, en modélisant les relations entre diverses variables représentant autant de grandeurs caractéristiques d'un système. Les premiers modèles étaient de simples équations mathématiques liant plusieurs variables entre elles, le but étant de déduire de ces équations les évolutions possibles des variables. Avec l'avancée des outils informatiques, ce formalisme a rapidement évolué vers une conceptualisation plus complexe. L'approche la plus utilisée, introduite par Forrester en 1968, est la Dynamique des Systèmes. Le système est vu comme une série de réservoirs (stocks) qui intègrent l'évolution temporelle des variables, entre lesquels des flux de matière ou d'énergie évoluent. Ce formalisme introduit par ailleurs des circuits d'information qui permettent à l'information de circuler entre les stocks et ainsi d'adapter les évolutions des flux ou des variables en conséquence (Degenne, 2011). Plusieurs logiciels génériques permettant de développer des modèles « stock-flux » sont utilisés, comme STELLA (Costanza, 1987) ou SIMILE (Muetzelfeldt and Massheder, 2003) (dont la dernière version a évolué sur des modèles plus individu-centrés) et permettent une construction aisée des modèles informatiques à partir d'un environnement graphique.

ii) Les approches ascendantes

Une autre approche de la modélisation a été développée, qui décrit les systèmes en partant de règles de comportements d'entités élémentaires d'un système (individu, cellule, agent). On simule les interactions d'un grand nombre de ces entités pour aboutir à l'évolution de l'ensemble du système. Ces approches se sont développées en plusieurs étapes avec à l'origine des modèles « individu centrés » qui ont évolué en modèle « multi-agents ».

- Les automates cellulaires ont été introduits au milieu des années 60 par Von Neumann et Ulam. Le modèle se présente sous forme de grille, où chaque cellule a un état attribué à l'instant t . Cet état est fonction à la fois de l'état des cellules voisines et de l'état de cette même cellule à l'instant $t-1$, selon des règles établies. À chaque pas de temps, l'état de toutes les cellules est revisité et modifié si besoin. Bien que grossièrement représentée, la dimension spatiale est intrinsèque au modèle via l'existence de la grille.
- Les systèmes multi-agents sont issus des travaux effectués sur l'intelligence artificielle distribuée. La notion d'agent est centrale dans cette approche : ce sont des entités logicielles relativement autonomes pouvant percevoir, communiquer, se reproduire, produire, consommer et transformer des objets. Les agents évoluent dans un environnement qu'ils peuvent modifier et en fonction duquel ils agissent (Weiss 1999). L'espace peut y être représenté de deux manières : il peut être utilisé comme support, via l'environnement représenté par une grille, ou comme agent. Dans ce deuxième cas, les entités paysagères sont-elles mêmes les agents et vont évoluer en interaction avec les autres entités spatiales. (Bousquet et Gautier 2014). Ce formalisme est aujourd'hui l'un des plus utilisés dans les domaines de l'agro-écologie, et de nombreux outils de modélisation ont été développés, comme NetLogo (Wilensky, 1999), Cormas (Bousquet et al., 1998) ou GAMA (Grignard et al., 2013).

iii) Les approches « Autre »

De plus en plus de modèles ne s'apparentent pas à ces deux premiers courants. Certains en font une approche croisée, comme Anylogic (Borshchev et Filippov, 2004) ou DYSPALLOC (Schaller, 2011). D'autres ont développé leur propre approche, à base de graphes (Openfluid (Fabre et al., 2010), DYPAL (Gaucherel et al., 2006)) ou de données raster associés à des facteurs de changements (e.g. CLUE (Veldkamp and Fresco, 1996), CLUE-S (Verburg et al., 2002), LANDIS (Mladenoff, 2004)). La plateforme de modélisation Ocelet (Degenne et Lo Seen, 2016) est quant à elle basée sur les graphes d'interaction.

Un exemple de ces approches alternatives est le formalisme DEVS. Ziegler développe la notion de Discret Event Specification (DEVS), en se basant sur la théorie des systèmes et leur capacité à évoluer et se transformer. Il caractérise les systèmes par une vision externe, une structure interne et une composition en plusieurs sous-systèmes. Des transitions d'état permettent de faire évoluer le système. (Degenne, 2011). Ce formalisme est donc basé sur des entrées, des sorties, des états et des fonctions (Baati, 2007). Le temps est continu, le système reste dans un certain état durant un temps déterminé avant d'évoluer, sauf si une perturbation amène un autre changement d'état avant la fin de la durée déterminée.

Les modèles de dynamiques de paysages sont donc nombreux et regroupent des formalismes très différents. Le spatial est représenté de manière inégale dans tous ces formalismes. Ainsi, les approches descendantes ne permettent pas de désagréger le système (en terme spatial). Les approches ascendantes intègrent en général mieux cette dimension spatiale, bien que beaucoup de modèles se limitent à une représentation à l'aide de grilles. Aujourd'hui une meilleure représentation de la dimension spatiale est néanmoins possible mais demande souvent un travail important de la part du modélisateur (Degenne, 2011). Dans la catégorie « autre », certains formalismes intègrent très peu la dimension spatiale (par exemple le formalisme DEVS) alors que d'autres tendent à représenter cette dimension de manière fine (Openfluid, DYPAL). Parmi toutes ces approches, Ocelet a été développé pour permettre une

manipulation fine et facilitée du spatial au sein des modèles (Degenne et Lo Seen, 2016 ; Castet, 2015).

3.2.3. Les modèles de culture

Les modèles de culture s'intéressent au développement de la plante. Il s'agit de formaliser les processus biologiques de développement des plantes en fonction des éléments de l'environnement (climat et sols) et parfois des pratiques culturales, avec un pas de temps journalier. Les données en sortie sont généralement des indicateurs du développement de la plante (surface foliaire, rendement, surface racinaire...) et de l'état des composantes du sol (réserve utile, taux de matière organique...). Trois mécanismes se retrouvent dans la grande majorité des modèles de culture (Boote et al., 1995) : le développement phénologique, l'évolution de la biomasse et l'évolution hydrique.

Pour l'Afrique Sub-Saharienne, 4 principaux modèles sont utilisés par les systèmes d'alerte précoce pour simuler le développement des céréales : STICS, DSSAT, APSIM et SARRA-H. Parmi eux, le modèle SARRA-H (Système d'Analyse Régionale des Risques Agro climatologiques Version H) V3.3 (Baron et al., 2005; Dingkuhn et al., 2003) offre des possibilités de simulation les dynamiques des biomasses des céréales (plusieurs variétés de mil, maïs et sorgho cultivées en milieu paysan), sous contrainte hydrique, à l'échelle de la parcelle. Contrairement aux autres, ce modèle présente l'intérêt d'être peu demandeur en données d'entrée (souvent peu disponibles pour la zone sub-saharienne), puisqu'il ne prend en compte les apports en minéraux que de manière simplifiée. Nous présentons ici ce modèle de manière un peu plus détaillée comme exemple du fonctionnement d'un modèle de culture. Nous le réutiliserons par la suite, dans les travaux de thèse.

SARRA-H simule les dynamiques de développement des céréales, à un pas journalier, à l'aide de trois modules intégrant trois grands processus inter-corrélés:

- La phénologie : concerne le passage des différentes phases phénologiques des plantes. Le cycle de croissance des plantes se divise en 4 phases : la phase végétative juvénile, la phase sensible à la photopériode, la phase reproductive et la phase de maturation. Durant chacune de ces phases, la plante va réagir de manière différente aux facteurs externes. Dans Sarra-H, les trois premières phases sont subdivisées en deux sous-phases, découpant ainsi la croissance en 7 phases phénologiques de manière à optimiser la gestion des méthodes de calcul. Le changement de phase s'effectue en fonction d'un seuil de degrés jours (somme de températures journalières), mis à part pour la phase dépendante de la photopériode qui dépend alors de la latitude et de la date de semis.
- Le bilan hydrique : calcule tous les transferts d'eau journaliers entre l'air, le sol et la plante pour estimer l'évapotranspiration et le stress hydrique. Le sol est modélisé en trois réservoirs : le réservoir de surface où a lieu le processus d'évaporation du sol, le réservoir en profondeur qui permet de simuler le front d'humectation (profondeur de la zone humide) et un réservoir contenant les racines dont la taille évolue en fonction du développement de l'appareil racinaire, et qui permet de simuler l'apport pour le processus de transpiration. Des processus de remplissage sont simulés pour chacun des réservoirs. Le remplissage se fait par le haut (la pluie) jusqu'à ce que le premier réservoir ait atteint sa capacité maximale, l'eau est alors reconduite dans le second réservoir et ainsi de suite.
- Le bilan carboné : répartit dans les biomasses le sucre dérivé de l'énergie solaire sous contrainte hydrique. Sarra-H utilise l'approche grande feuille, où la surface foliaire est

considérée à l'échelle du peuplement d'une parcelle. Cette surface détermine la part du rayonnement intercepté qui permet la création d'assimilats ensuite répartis entre les biomasses suivant des règles d'allocations variant selon les phases.

Le modèle demande de fournir des données d'entrée concernant le climat (pluie, évapotranspiration, humidité, température, rayonnement ...), le type de sol et les pratiques culturales (variétés, dates et densités de semis, irrigation, fertilisation) (fig. 3).

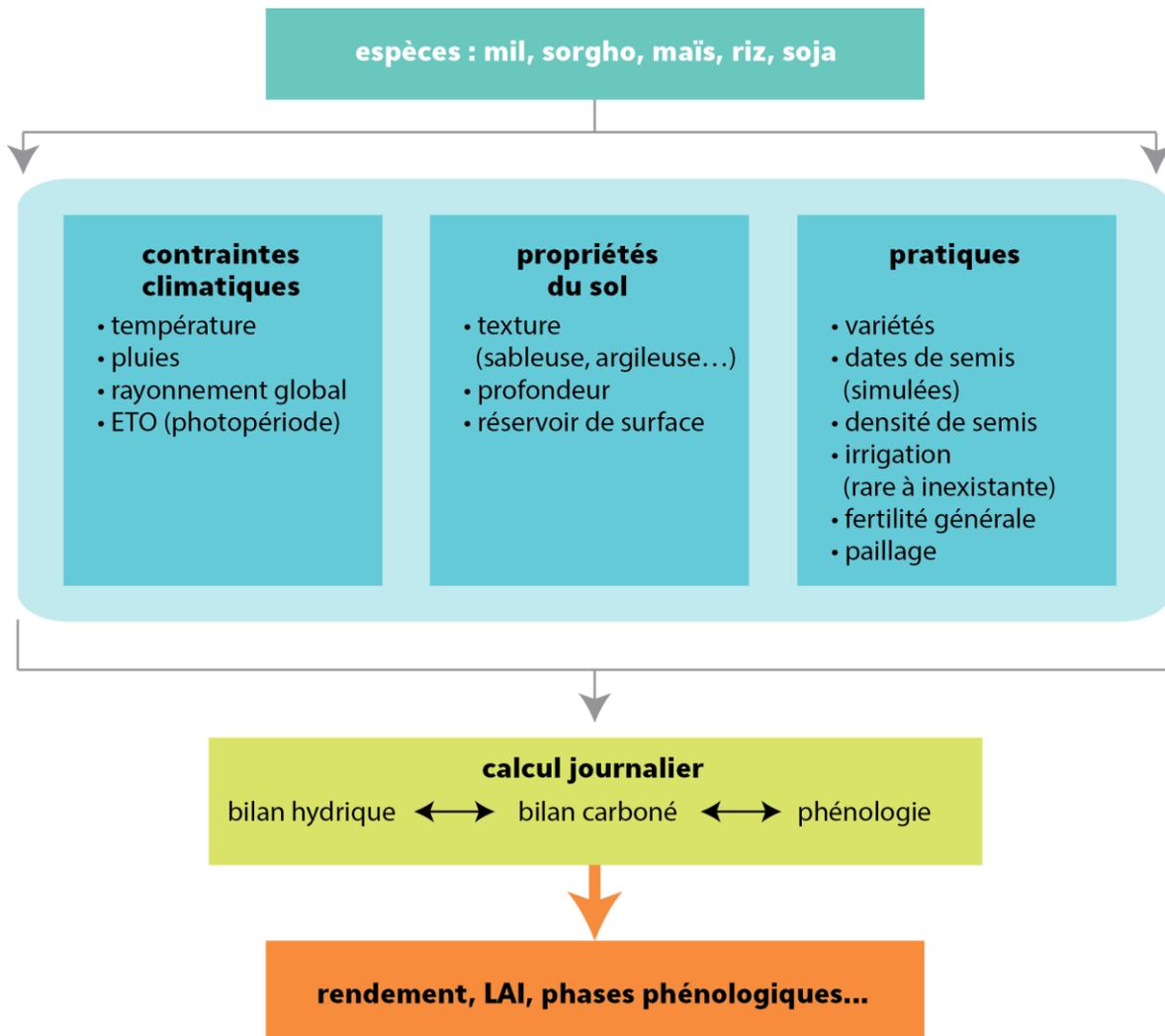


Figure 3: Schématisation du fonctionnement du modèle SARRA-H.

SARRA-H est utilisé par le système d'Alerte précoce AGRHYMET, et est majoritairement appliqué pour l'analyse des risques climatiques de la parcelle à la région, le suivi de l'état des cultures en cours de saison et la prédiction de rendements potentiels ainsi que l'analyse de l'adaptation de stratégies paysannes face aux changements de l'environnement.

3.2.4. Intégration des modèles de culture dans les modèles de dynamiques de paysages

Dans plusieurs approches, les modèles de culture sont intégrés à l'échelle du paysage (e.g. Donet, 1999; Leenhardt et al., 2010 ; Veldkamp, 2001 ; Yun, 2003) (fig.4).

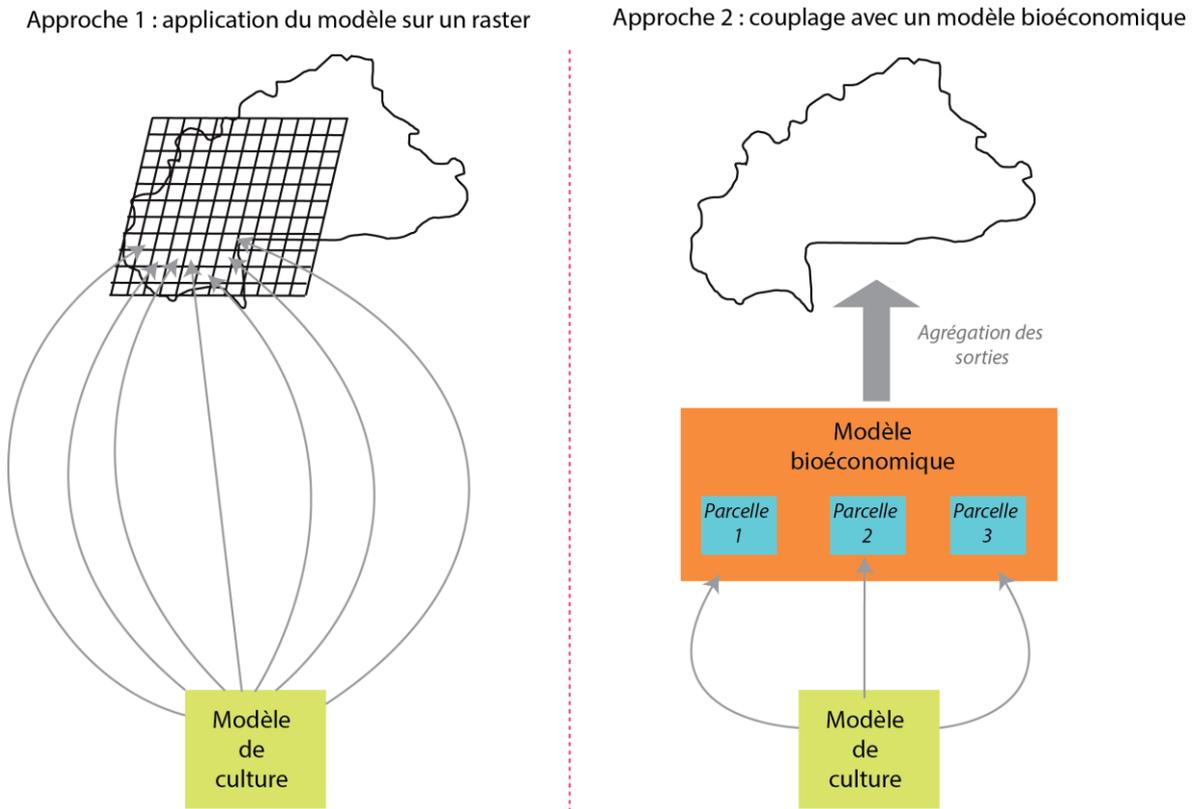


Figure 4: Méthodes d'intégration des modèles de culture au niveau régional.

Généralement, cela s'effectue en appliquant le modèle à différents points d'un raster (issu de la télédétection) sur lequel les zones culturelles ont été identifiées par traitement de l'image et les données d'entrée du modèle ont été spatialisées (Castets, 2015; Faivre et al., 2004). De cette manière, le modèle de culture est spatialisé, mais les dynamiques paysagères ne sont pas prises en compte.

À notre connaissance, il n'existe pas de modèle liant directement les modèles de culture aux dynamiques paysagères. Pour passer à l'échelle régionale, les modèles transitent en général par un modèle bioéconomique de fonctionnement d'une exploitation couplé avec le modèle de culture concerné (Janssen et al., 2007). Les sorties du modèle de culture sont alors réinjectées dans le modèle d'exploitation (basé sur la simulation du comportement d'exploitations type identifiées). Les résultats du modèle d'exploitation peuvent, in fine, être agrégés à l'échelle de la région. Ainsi, le modèle SEAMLESS couple un modèle de culture à un modèle d'exploitation, et agrège les résultats à un niveau global pour les coupler à un modèle d'évolution des marchés (Van Ittersum et al., 2008).

Cette méthode présente l'inconvénient de n'aborder que très partiellement l'utilisation/couverture du sol. Le transfert d'échelle effectué consiste en effet surtout à agréger les résultats à l'échelle régionale sans prendre en compte d'importantes dynamiques paysagères.

- D'une part cette agrégation pose des **problèmes de distorsion de l'information** : la répétition du fonctionnement d'une même exploitation sur un territoire donné est peu représentative de la diversité existante des exploitations.
- D'autre part, si les dynamiques internes aux exploitations agricoles sont bien représentées dans ces couplages de modèles de culture/exploitation/évolution des marchés (assolement, évolution de leur surface), **les dynamiques territoriales sont en général incomplètes** (par exemple l'évolution du nombre d'exploitations).

3.3. Utilisation conjointe de la modélisation et de la télédétection

Plusieurs approches développent l'utilisation conjointe de la télédétection et des modèles. La télédétection permet d'obtenir des informations sur l'état de la végétation et les paysages alors que les modèles décrivent les processus à l'origine des dynamiques observées sur les images. Ces deux outils sont donc complémentaires pour le suivi et la compréhension des dynamiques de végétation.

Nous distinguons deux types de liens réalisés entre les modèles et les données satellitaires (fig. 5) :

- De l'image vers le modèle : forçage et assimilation (Lauvernet, 2005).

Les données satellitaires sont utilisées de deux manières dans les modèles. Tout d'abord, elles servent de données de forçage, en fournissant aux modèles les valeurs de variables d'entrée. Le forçage avec des images de télédétection est utilisé dans les modèles de dynamiques de paysages comme dans les modèles de culture. Le forçage consiste à réactualiser la variable d'état simulée en la remplaçant par la valeur déduite des données radiométriques.

Une deuxième utilisation de la télédétection dans les modèles concerne les méthodes d'assimilation (François et al., 2001). L'assimilation de données concerne « *l'ensemble des méthodes permettant de combiner de façon optimale les différents types d'informations auxquels on a accès : information mathématique sur les processus décrits par le modèle et information physique des observations* » (Le Dimet et Blum, 2002, cité par Lauvernet, 2005). L'assimilation des données satellitaires dans un modèle va consister à corriger et/ou recalibrer le modèle en fonction des informations d'état de la végétation issues de la télédétection. Une présentation détaillée des méthodes d'assimilation fera l'objet de la première partie du chapitre V. Ces méthodes sont de plus en plus utilisées pour les modèles de culture, mais **elles n'ont, à notre connaissance, encore jamais été appliquées aux modèles de dynamiques de paysages.**

- Du modèle vers l'image : spatialisation des modèles ponctuels.

Comme vu précédemment (3.2.4 .), des modèles de culture sont souvent spatialisés en utilisant les images de télédétection qui donnent des indication sur le domaine cultivé et, pour certaines régions du monde où le parcellaire est de grande taille, les espèces cultivées.

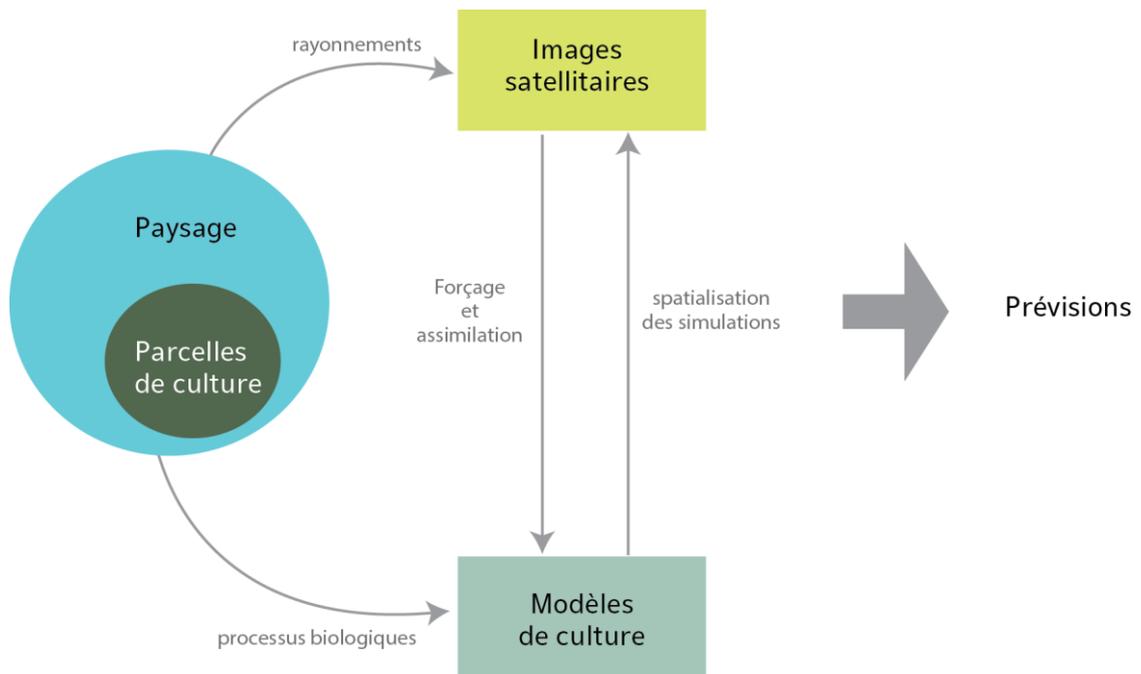


Figure 5: Couplage entre données satellitaires et modèles de culture.

.....

BILAN :

Les données satellitaires couvrant une large étendue sont de résolution spatiale moyenne qui ne permet pas de distinguer de manière fine les éléments du paysage.

Plusieurs modèles permettent d'étudier les différentes composantes du paysage issues de différentes échelles, mais leur couplage provoque des problèmes de déformation de l'information.

Si la télédétection est utilisée conjointement avec les modèles de culture, peu de liens sont faits avec les modèles de dynamiques de paysages.

.....

4. Objectifs, questions de recherche et organisation de la thèse

4.1. Objectifs et questions de recherche

Dans le cadre du développement des systèmes d'alerte précoces pour assurer la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest, un double constat est fait:

- Il est nécessaire d'avoir un suivi prospectif des dynamiques des paysages agricoles et particulièrement de l'occupation, l'utilisation, et la production des sols. Ce suivi doit se faire sur une étendue régionale (ou administrative) de manière à permettre la prise de décisions et la mise en œuvre d'interventions.
- Pour ce faire, les méthodes actuelles se heurtent à un problème d'échelle. Les données satellitaires sont souvent de trop faible résolution spatiale pour étudier finement les parcelles de cultures et les modèles sont souvent spécialisés à une échelle particulière : la transition entre échelles menant en général à une déformation ou à une perte d'information.

L'objectif général de la thèse est donc de **proposer une approche permettant d'améliorer les outils utilisés pour le suivi des dynamiques des paysages dans le but d'affiner la connaissance des mécanismes induisant ces dynamiques**. Plus précisément, l'objectif est de **mettre en place une méthode de suivi et de prévision (pluri)annuels des productions agricoles, et, à plus long terme, des mutations agraires d'une zone d'étude, sur une étendue adaptée aux prises de décision politiques et d'aménagement**.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs questions de recherche se posent :

- *Comment effectuer un transfert d'échelle pour documenter les dynamiques agraires sur une large zone, en partant de l'échelle de la culture jusqu'à l'échelle régionale sans perte ou déformation d'informations? Plus précisément, comment intégrer dans un même modèle des éléments, processus et facteurs interagissant et issus d'échelles différentes?*

Réaliser un transfert d'échelle au sein d'un modèle qui permettrait de lier l'occupation, l'utilisation et la production du sol est essentiel pour le suivi des dynamiques des paysages. Notre objectif est donc de **réaliser ce transfert d'échelle en développant un modèle multiscalaire des dynamiques agraires de la province du Tuy**.

- *Quelles informations apportent ces outils sur les dynamiques récentes et actuelles de la zone d'étude et quelles sont les perspectives pour les dynamiques futures ?*

Les systèmes d'alerte précoce travaillent conjointement sur plusieurs axes, impliquant différents aspects des dynamiques agraires. Notre objectif est d'**illustrer les études thématiques permises par le développement du modèle, en prenant l'exemple de la province du Tuy.**

- *Comment utiliser conjointement les modèles de dynamiques agraires et les données de télédétection pour i) améliorer l'extraction d'information concernant des objets de taille très inférieure à la résolution des images satellitaires, ii) renforcer les modèles de dynamiques agraires ?*

Les images satellitaires sont des outils essentiels au suivi des dynamiques de végétation, mais l'extraction et la compréhension de leurs signaux est aujourd'hui un défi nécessaire à relever pour améliorer l'élaboration de scénarios prospectifs réalisés avec les modèles.

Notre objectif est d'**aller vers une meilleure compréhension de l'information de végétation contenue dans les images et de ses déterminants tout en renforçant les outils de modélisation de ces déterminants.**

4.2. Organisation générale de la thèse

La figure 6 présente l'organisation de la thèse. La thèse s'articule autour de quatre articles répondants aux différentes questions de recherche. Le premier article est accepté, le second a été soumis et les deux derniers sont en cours d'écriture et devraient être soumis prochainement. Les deux premiers articles sont en anglais et sont donc préfacés d'un résumé en français.

Le manuscrit se compose en quatre chapitres faisant suite à ce premier chapitre introductif.

Une première partie (chapitre II) présentera l'approche systémique employée pour répondre aux questions de recherche, ainsi que la zone d'étude choisie, la province du Tuy.

Une seconde partie (chapitre III) présentera la réponse apportée à la première question de recherche, à savoir le développement d'un modèle multiscalair, liant la production, l'occupation et l'utilisation du sol.

Article 1 : Jahel C., Baron C., Vall E., Karambini M., Castets M., Coulibaly K., Bégué A., Lo Seen D., 2016. *Spatial modelling of agro-ecosystem dynamics across scales: A case in the cotton region of West-Burkina Faso. Agricultural Systems.* (In press).

Le chapitre IV présentera ensuite deux illustrations de l'utilisation de ce modèle sous forme de deux articles, répondant ainsi à la deuxième question de recherche. Chacun des articles concerne un des deux axes des systèmes d'alerte précoce étudiés. Ainsi, un premier article explore les perspectives de déforestation dans la province du Tuy, se rattachant à l'axe du suivi

prospectif à plus long terme des dynamiques agraires. Le second article concerne la modélisation des stratégies d'assolement et se rattache à l'axe du suivi et de la prévision saisonnière des productions agricoles.

Article 2 : Camille Jahel, Eric Vall, Alejandro Zermeno, Xavier Augusseau, Danny Lo Seen, 2016. *Analyzing plausible futures from past patterns of land change in West Burkina Faso*. Soumis à Land Use Policy.

Article 3 : Jahel C., Augusseau X., Lo Seen D., 2017. *Modélisation des processus de décision des assolements : quelle marge de manœuvre pour les agriculteurs du Burkina Faso ?* En cours d'écriture.

Enfin, le chapitre V présentera les avancées réalisées concernant l'extraction d'information à partir d'images satellitaires de moyenne résolution via l'utilisation du modèle construit. Ce dernier chapitre sous forme d'article répond ainsi à la troisième question de recherche.

Article 4 : Jahel C., Leroux L., Mathieu Castets, Bellon B., Bégué A., Baron C., Lo Seen D., 2017. *Détecter les processus de changement des paysages dans les images, le lien entre modélisation spatiale et télédétection*. En cours d'écriture.

Une dernière partie conclura le manuscrit en revenant sur les contributions de ces travaux de thèse et en évoquant les différentes perspectives que cette thèse a ouvertes.

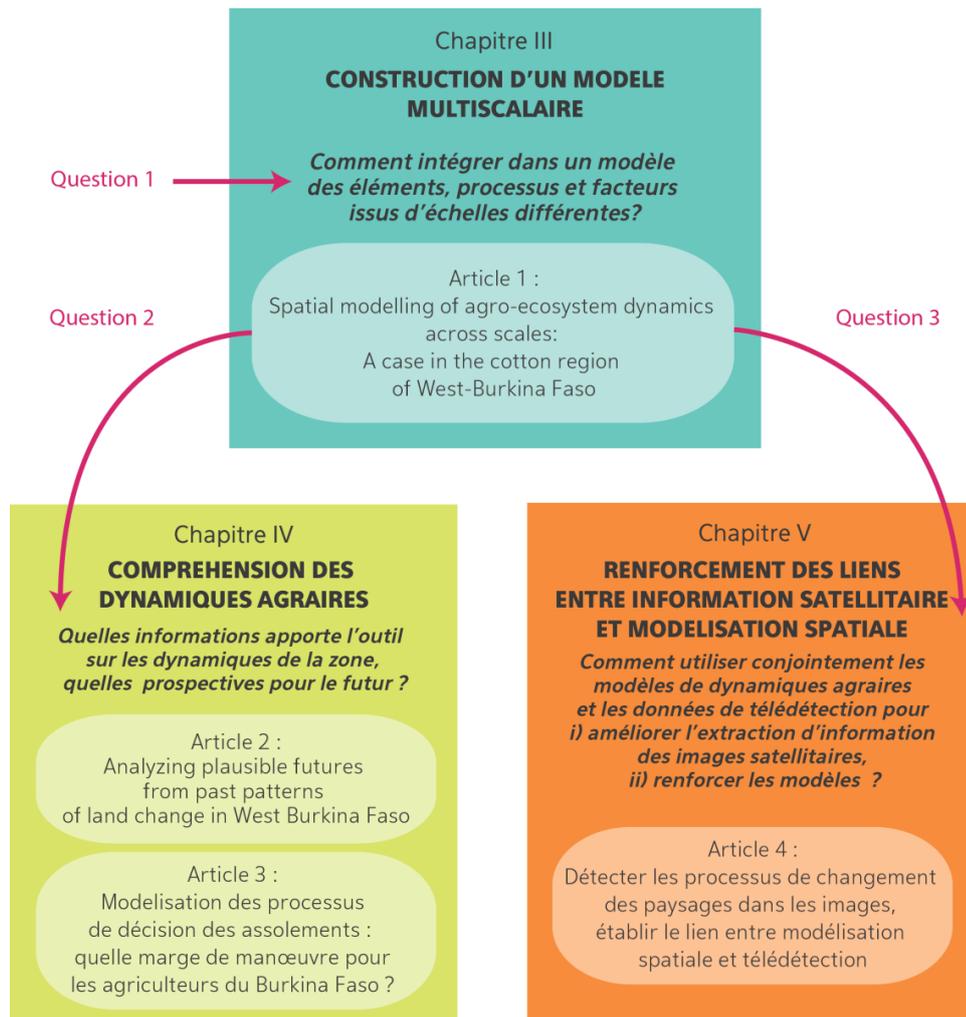


Figure 6 : Organisation générale de la thèse.

Chapitre II :
Approche et données



Chapitre II : Approche et données

Dans ce chapitre, nous introduisons l'approche systémique, choisie comme cadre conceptuel pour répondre aux objectifs de cette thèse. Ce cadre conceptuel permet d'appréhender un paysage agricole selon un découpage en deux grands systèmes inter corrélés, l'agrosystème et l'écosystème.

Nous présentons ensuite la zone d'étude par une description de l'écosystème et des composantes de l'agrosystème, i.e. ses principaux systèmes de production et systèmes de culture. Pour finir, nous esquissons un récapitulatif des dynamiques agraires à l'œuvre avant la période étudiée, afin d'appréhender les dynamiques récentes à la lumière de l'histoire ancienne.

Les données présentées dans cette partie (typologie, prix, données de population, etc.) sont celles qui seront utilisées dans la suite de la thèse. Une seconde présentation plus détaillée de ces mêmes données est aussi faite en Annexe (Annexes 2 et 3).

1. L'approche systémique pour l'étude des paysages agricoles

1.1. Paysages et agroécosystèmes

Nous avons vu plus haut que les paysages agricoles reflétaient une réalité complexe, à l'interface de multiples disciplines. Ils contiennent des éléments organisés et souvent hiérarchisés, liés entre eux, dont la lecture se fait à plusieurs échelles ; le tout évoluant avec le temps. L'étude des paysages agricoles requiert donc une approche holistique formelle permettant d'organiser et hiérarchiser les éléments contenus dans le paysage, en manipulant des entités simples et basiques (Conway 1984). L'approche systémique offre un tel cadre pour l'étude de ces paysages complexes (Kuemmerle 2013). Elle consiste en la conceptualisation d'une réalité sous forme de système, soit un « complexe d'éléments en interaction » (Bertalanffy 1980), où la modification de l'état d'un de ces éléments entraîne celle des autres et fait ainsi évoluer le système (Lugan 2009). Chaque système peut contenir des sous-systèmes hiérarchisés en interaction (Conway 1984). L'approche systémique aborde donc une réalité complexe en la modélisant de façon simplifiée sous la forme d'un système, tout en gardant les éléments et processus principaux de cette réalité, qui confèrent au système une relative autonomie par rapport à un ensemble d'éléments plus vaste (Lugan, 2009). Cette approche a déjà été largement utilisée pour aborder les problématiques du monde rural, notamment dans la compréhension des pratiques et des relations entre les différents types d'agricultures et l'écosystème.

Pour étudier les paysages agricoles, Benoit et al. (2012) introduisent la notion d'*agronomie du paysage* (landscape agronomy), qui lie l'organisation du paysage aux pratiques culturales et aux ressources naturelles. Ils décrivent le paysage agricole comme le fruit des interactions entre les pratiques agricoles et les ressources naturelles. Pour relier l'agronomie du paysage à l'approche systémique, nous introduisons le concept d'agroécosystème qui regroupe les pratiques agricoles et les ressources naturelles et permet ainsi d'analyser de manière systémique les paysages agricoles (fig.7, en fin de partie).

L'agroécosystème est défini par Morère et Pujol (2003) comme « *un espace cultivé, inclus dans un ensemble agricole diversifié ; [dont] la gestion reste davantage soumise aux lois de la nature, à savoir l'action des facteurs limitants susceptibles de diminuer la production* ». Les agroécosystèmes sont donc des systèmes complexes, mêlant les dimensions biophysiques et humaines, dont les sous-systèmes sont reliés entre eux par des relations non-linéaires et des rétroactions souvent imprévisibles (e.g. Veldkamp, 2001; Agarwal, 2002; Tassin, 2012). Une simplification de cette définition consiste à appréhender l'agroécosystème comme un système hybride, englobant deux sous-systèmes en interaction, i.e. l'écosystème et l'agrosystème (Tassin, 2012). L'écosystème est une « *manière simplifiée mais structurée d'envisager la nature* » (O'Neill, 2001), et contient plusieurs sous-systèmes qui varient selon les approches. On distingue par exemple les sous-systèmes biodiversité, eau, air, climat et sol (Lecerf, 2008). L'agrosystème englobe quant à lui les éléments et processus relatifs à la production agricole. Sa spécificité majeure est d'être piloté par l'homme, et donc d'être issu de plusieurs systèmes décisionnels. Tassin (2012) le définit comme « *un espace piloté dévolu à la production agricole, historiquement construit, et dont la cohérence spatiale et fonctionnelle résulte d'une succession de systèmes décisionnels* ». L'agrosystème peut être scindé en plusieurs sous-systèmes intervenant dans l'activité productive d'une région, chacun étant situé à une échelle spécifique de prise de décision (la parcelle, l'exploitation agricole, la région agricole).

1.2. Sous-systèmes des agrosystèmes

Suivant l'approche de Mazoyer et Roudart (1997), les deux sous-systèmes emboîtés et inter corrélés d'un agrosystème sont les systèmes de culture et les systèmes de production.

1.2.1. Les systèmes de culture

Les systèmes d'alerte précoce s'intéressent aux tendances de production d'une région agricole, dont les deux déterminants sont la surface et les rendements. Ces derniers sont facilement étudiables à l'échelle de la parcelle ou d'un groupe de parcelles. Nous introduisons les systèmes de culture comme objet de notre étude.

La notion de système de culture peut être définie de plusieurs façons selon les groupes de recherche qui l'ont abordé. En France, elle a été développée au SAD (Systèmes Agraires et Développement, INRA) alors que le concept de « cropping system » est dérivé des travaux anglophones sur la « Farming System Approach » (IFSA) (Gasselin, 2013). Les deux définitions sont proches, mais le courant anglophone est plus porté sur l'aspect technique de la conduite des cultures qu'il place en priorité notamment devant la dimension sociale plus présente dans l'approche système de culture de l'INRA (Papy, 2008). Pour notre travail, nous nous positionnons dans l'approche SAD, en nous référant à la définition donnée par Sébillote en 1990 : « *un système de culture est l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur*

des parcelles cultivées de manière identique. Chaque système se définit par : la nature des cultures et leur ordre de succession, les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés ». Selon cette définition, les itinéraires techniques se définissent comme une « *combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée* » (Sébillote, 1974).

La dimension sociale est intrinsèque à cette définition, puisque les pratiques culturales, les successions et les variétés choisies découlent de la décision de l'agriculteur, prise dans un contexte socio-économique particulier. Jouve (2006) le souligne lorsqu'il écrit que « *les systèmes de culture sont le produit de la culture et des hommes* ».

Les systèmes de culture sont liés entre eux et plusieurs sont rassemblés au sein d'une exploitation agricole. On introduit ici la notion de système de production, qui va nous permettre de passer de l'échelle de la parcelle au niveau de l'exploitation.

1.2.2. Les systèmes de production

On désigne par système de production l'ensemble formé par l'exploitation (Brossier, 1987). Reboul (1976) le définit comme « *un mode de combinaison entre terre, force et moyens de travail à des fins de production végétale et/ou animale, commun à un ensemble d'exploitations* ».

Cette échelle d'analyse est pertinente puisqu'elle permet d'étudier les liens et la cohérence entre les systèmes de culture et de comprendre les choix faits par l'agriculteur concernant leur gestion et les buts poursuivis. C'est en outre à ce niveau que l'on peut étudier les filières de productions, les relations de voisinage, etc. (Cochet et al., 2007).

Là encore, la notion de système de production englobe donc tous les aspects techniques et biologiques liés à une conduite de culture et fait aussi appel à d'autres dimensions de natures variées : la dimension écologique en lien avec l'écosystème (la répartition des systèmes de culture en relation à leur milieu biophysique), historique (les dynamiques du passé ont conduit aux systèmes de culture actuels en lien avec), politico-économique (influence des lois et des marchés sur les décisions de l'agriculteur), sociale (relations de voisinage, rôle de la famille), etc.

1.2.3. Liaison des systèmes de culture et de production au sein de l'agrosystème

L'agrosystème englobe les systèmes de culture et de production, et les relie entre eux et au milieu.

Une étude de l'agrosystème va donc permettre d'obtenir une compréhension fine des interactions entre les systèmes de production, en croisant les composantes naturelles, historiques, politiques, économiques et sociales d'un territoire, de façon à générer une vision globale des dynamiques agraires de la zone étudiée.

C'est cette combinaison des différentes échelles d'analyse du système, de la parcelle à l'agrosystème, qui permet d'appréhender et de synthétiser la complexité des dynamiques agricoles, répercutées sur les paysages agricoles (Cochet, 2011). Ces définitions permettent en

outre une approche non seulement multiscalaire du paysage agricole, mais aussi multidisciplinaire, puisqu'elles impliquent et mettent en relation les sciences écologiques, agricoles, sociales, économiques, etc. Ce type d'approche est indispensable pour analyser les paysages agricoles sans risquer d'omettre un facteur important pour le fonctionnement et la compréhension du système (Verburg et Veldkamp, 2001).

L'agroécosystème est amené à évoluer dans le temps, soumis à des facteurs externes qui impactent les systèmes et leurs relations. La figure 7 présente une synthèse du cadre conceptuel avec lequel nous abordons l'étude des paysages agricoles.

Pour la suite de cette thèse, nous emploierons désormais le terme « modèles de dynamiques des agroécosystèmes » pour désigner les « modèles de dynamiques de paysages » présentés au chapitre I.

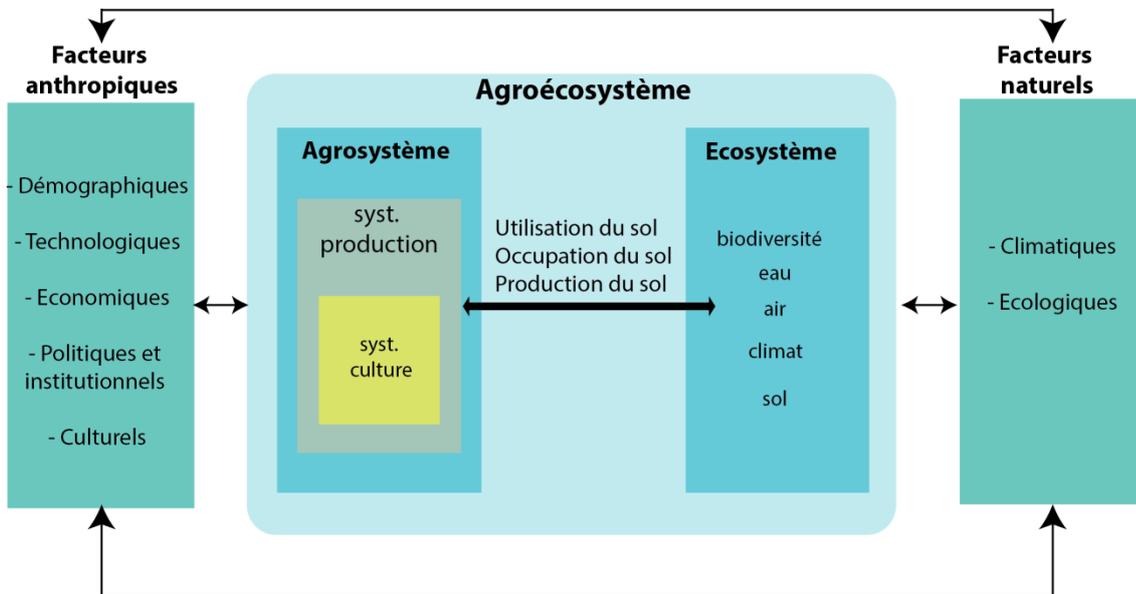


Figure 7 : organisation de l'agroécosystème et lien avec les indicateurs paysagers (utilisation, occupation et production du sol) et leurs facteurs déterminants.

2. Présentation de la zone d'étude et données utilisées

Le Burkina-Faso se divise en trois zones climatiques, avec au nord la zone sahélienne aux 450 mm.an⁻¹ de pluie, sur laquelle se trouve le plateau Mossi, et au sud la zone soudanienne avec des pluies annuelles pouvant aller jusqu'à 1200 mm. Notre zone d'étude se situe dans la frange intermédiaire sahelo-soudanienne, dans l'ouest cotonnier du pays, et plus particulièrement sur la province du Tuy (fig. 8). Cette zone a été choisie car elle a les caractéristiques requises pour notre étude, à savoir :

- un paysage fragmenté, avec des parcelles de petites tailles, nous permettant d'appréhender la problématique de suivi de telles zones par les images satellitaires de moyenne résolution spatiale ;
- d'importants changements de paysages, conséquences de l'évolution rapide de l'organisation de l'agroécosystème ;
- un nombre élevé de travaux sur les dynamiques agraires de la zone ;
- une forte disponibilité en images satellitaires sur une de ses communes (la commune de Koumbia).

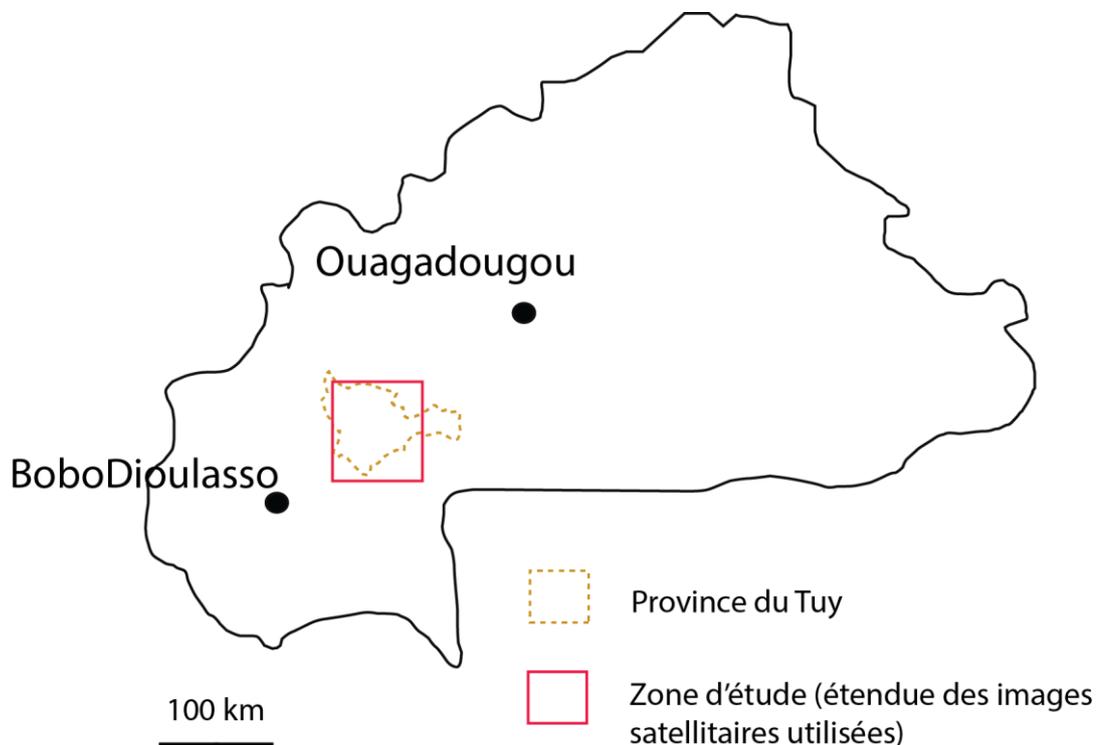


Figure 8: Localisation de la zone d'étude.

2.1. Les paysages de la province du Tuy

La province du Tuy se situe dans la région cotonnière ouest du Burkina Faso, à 60 km au nord-est de Bobo Dioulasso, et couvre une superficie d'environ 5600 km². Notre étude porte sur la partie centrale de la province et ne considère pas les deux extrémités ouest et est (figure 8). Cette contrainte résulte de la disponibilité en images satellitaires, le cadrage de la zone ayant été réalisé en fonction de l'étendue des images que nous pouvions obtenir.

2.1.1. Milieu naturel

Le paysage est composé d'un enchaînement de plaines séparées par de petits massifs collinaires. Le réseau hydrique y est peu abondant avec la plupart des cours d'eau à sec durant la saison sèche. En saison des pluies, le volume d'eau des rivières rend parfois difficile l'accès aux villages les plus reculés.

La zone est traversée du nord au sud par un massif plus élevé pouvant atteindre 460 m d'altitude (fig.11). Ce massif est de type andésitique et constitué de collines à roches basiques aux pieds desquelles se sont développés des sols bruns eutrophes, reconnus pour leur richesse en éléments minéraux (Leprun et Moreau, 1961 ; Moran P., 1991).

De part et d'autre de ce massif s'étendent de grandes plaines à roches cristallines birrimiennes, alternant avec de petits massifs collinaires cuirassés. Ce sont en majorité des sols ferrugineux tropicaux, dérivés de sols ferrallitiques ayant subi une forte pédogenèse à une époque où les pluies étaient bien plus abondantes. Cette pédogenèse est à l'origine de sols profonds et lessivés. Avec des climats moins humides, l'eau des nappes phréatiques remonte par capillarité, entraînant avec elle les oxydes de fer et d'alumine qui forment des cuirasses ferrugineuses en cristallisant au contact de l'air. Ces croûtes sont à des profondeurs variées, mais affleurent généralement en haut des buttes ou aux sommets des interfluves, rendant ces massifs collinaires incultivables (Bainville et Dufumier, 2009).

L'érosion de ces cuirasses donne lieu à une accumulation de sédiments en contrebas et à la formation d'un glacis d'érosion. Les sols de ces glacis sont plus lourds et compacts mais aussi plus profonds, à texture pouvant aller de gravillonnaire à limoneux argileux en fonction de l'emplacement le long de la toposéquence (Moran P., 1991). Ce sont des sols fertiles mais difficiles à travailler manuellement.

Enfin, les bas-fonds présentent des sols hydromorphes, à bonne fertilité chimique mais régulièrement inondés et très compacts (fig. 9).

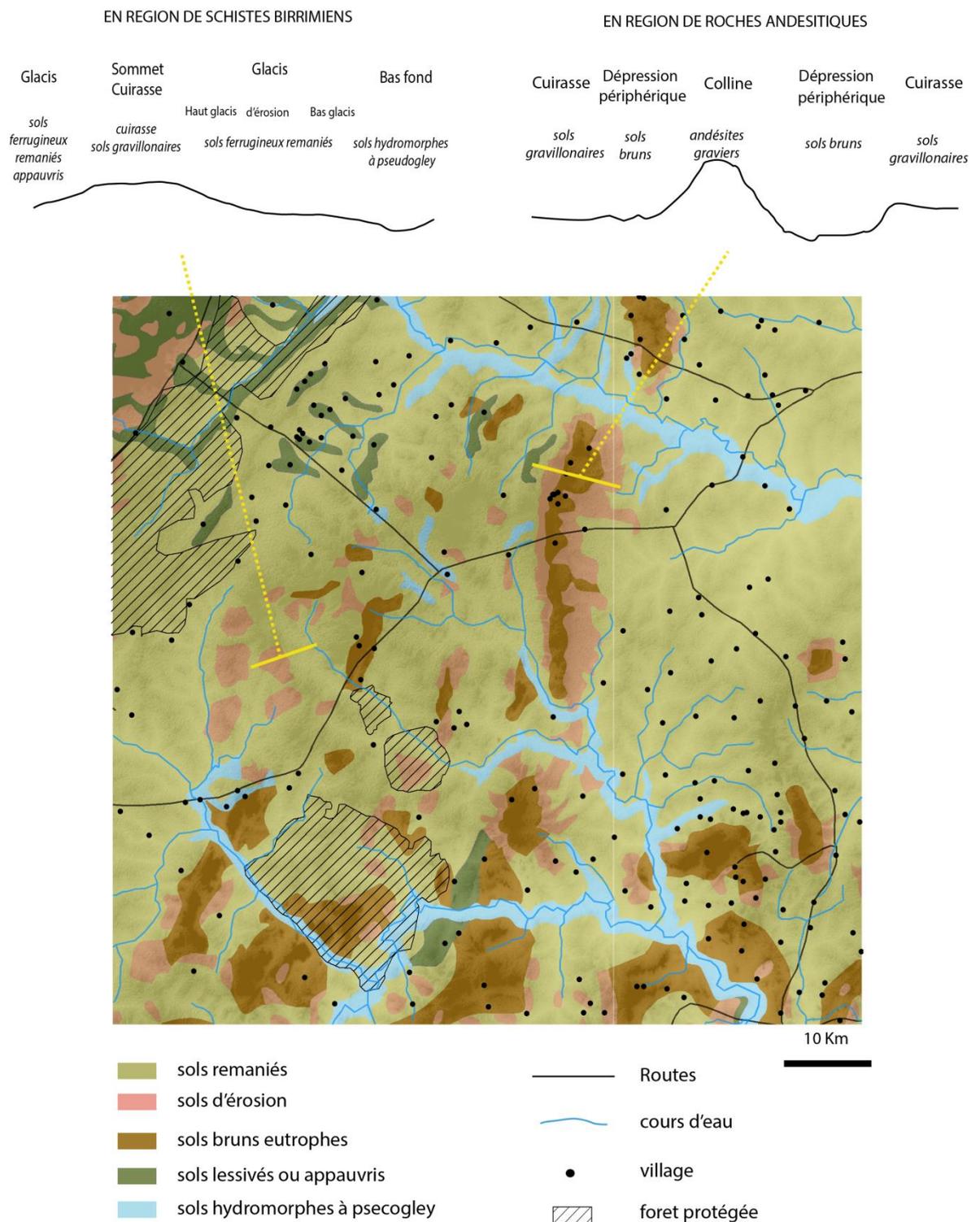


Figure 9 : Pédologie de la zone d'étude (Leprun et Moreau, 1961 ; Moran P., 1991).

Le climat dans la zone d'étude est de type Sahelo-soudanien avec une saison pluvieuse de mars à octobre, et des précipitations moyennes de 900 mm.an⁻¹ (fig.10). Ce climat est plus attractif pour les activités agricoles comparé aux deux autres zones climatiques, et particulièrement adapté à la culture du maïs. Un léger gradient climatique nord-sud s'observe le long des 100

km séparant les extrémités. Cette différence spatiale de pluviosité entre les valeurs extrêmes atteint en moyenne de 240 mm.an⁻¹ mais peut aller jusqu'à 400 mm certaines années.

D'une année à l'autre, la différence des pluies dans une même station est en moyenne de 175 mm, avec un maximum de 600 mm enregistré entre 2005 et 2006. L'aléa climatique est donc un facteur important dans la province du Tuy, et sa prise en compte est nécessaire à la compréhension des dynamiques de l'agroécosystème.

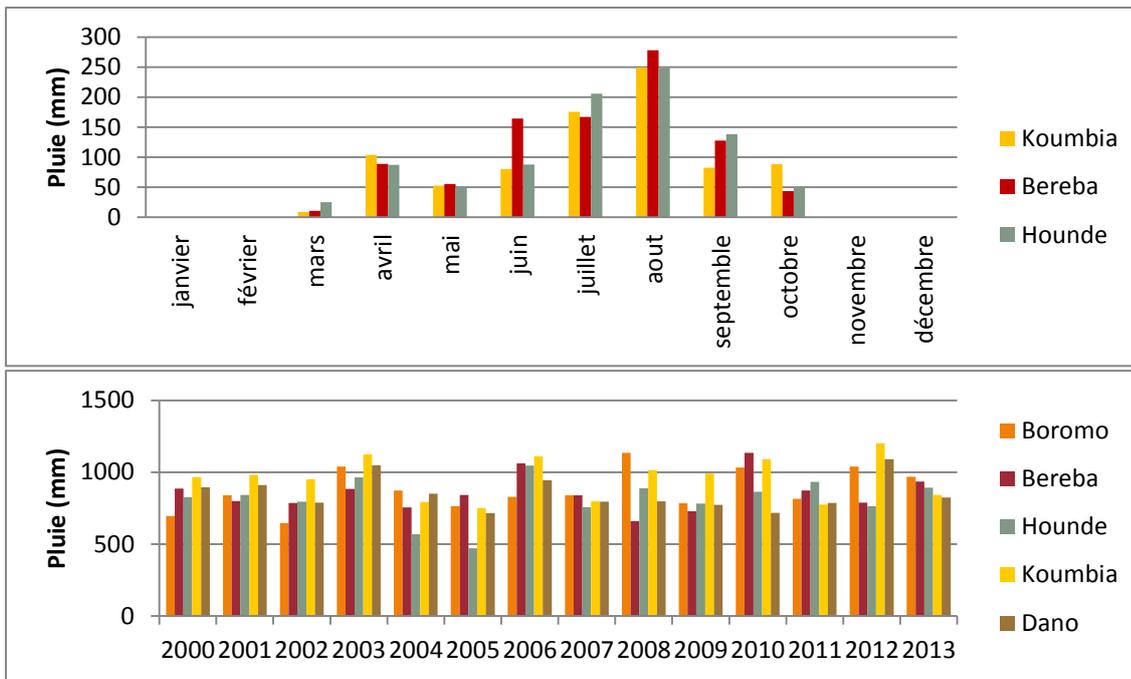


Figure 10 : Pluviométrie annuelle et interannuelle (source MeteoNat Burkina Faso, Modèle numérique de terrain).

La végétation naturelle alterne entre forêts claires et savanes. Ces dernières sont constituées d'un tapis de graminées sous couverts arborés, mélange d'épineux (comme les acacias), de karités, de nérés et de caïllcedrats (Morant, 1991).

2.1.2. Peuplement et réseau

La zone est traversée par l'axe routier reliant la capitale Ouagadougou à la seconde ville Bobo-Dioulasso. Sa proximité avec Bobo-Dioulasso (60 km) et les nombreuses connexions routières font d'elle une zone dynamique aux multiples échanges avec la ville (fig. 11).

La ville de Houndé se distingue au sein de la province de par sa taille et son importance. Les autres agglomérations sont des villages avec en moyenne 1900 habitants au dernier recensement de 2006 (RGPH, 2006). La répartition spatiale de ces villages témoigne de l'histoire ancienne de la zone. En effet, une forte densité de villages est observable au nord-ouest et au centre du massif andésitique (fig. 9 et 11). Ce sont les zones en hauteur, où historiquement les gens préféraient s'installer, pouvant ainsi voir leurs ennemis de loin et vivre à l'abri des dangers de la forêt des glacis tels que les animaux sauvages (Serpantié, 2003 ; Savonnet, 1986). Lorsque l'on observe plus précisément ces zones de forte densité, on distingue une répartition particulière des villages, avec souvent un village isolé et plusieurs

regroupés. Les premiers arrivants s'étant installés sur de larges étendues, les seconds leur ont demandé la permission de venir s'installer à côté. Les autochtones leur ont en général indiqué des espaces en périphérie de leur territoire, et les ont installés proches les uns aux autres de manière à avoir une surface d'expansion limitée.

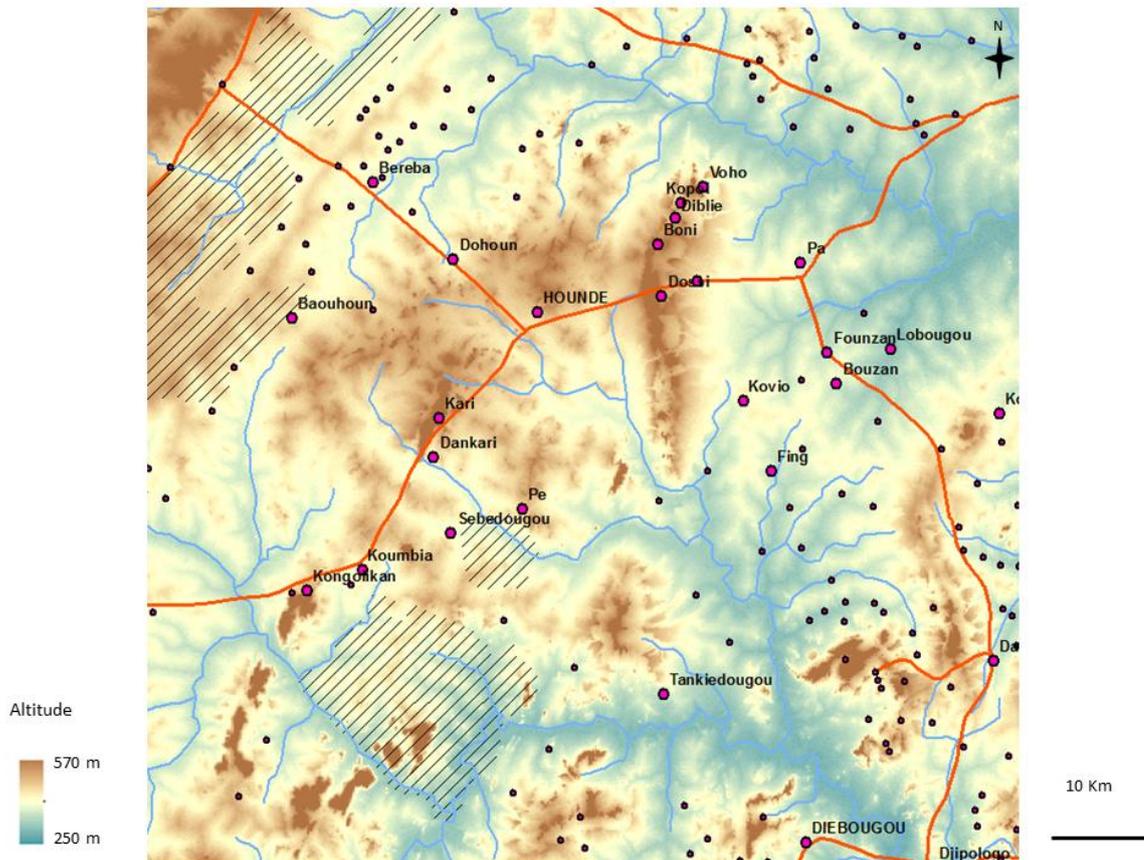


Figure 11: Relief, villages et axes routiers.

L'ethnie dominante est l'ethnie Bwaba, habitants originaires de la zone. Elle est suivie de près par l'ethnie Mossie, dont les populations sont originaires des régions plus au nord. La troisième la plus importante est l'ethnie Peuhls. Le sud-est de la zone accueille des ethnies différentes, majoritairement Dafting et Pougoulis. Nous verrons que ce mélange d'ethnies joue un rôle important dans les dynamiques de la zone d'étude.

2.2. L'activité agricole aujourd'hui

Le domaine cultivé représente aujourd'hui 48% de la zone d'étude. Le reste se partage en zones de végétation naturelle (48 %), zones de cuirasses (2%) et zones urbanisées (1%). 16 % des zones en végétation naturelle est classée en forêts protégées depuis les années 1990 (fig. 12).

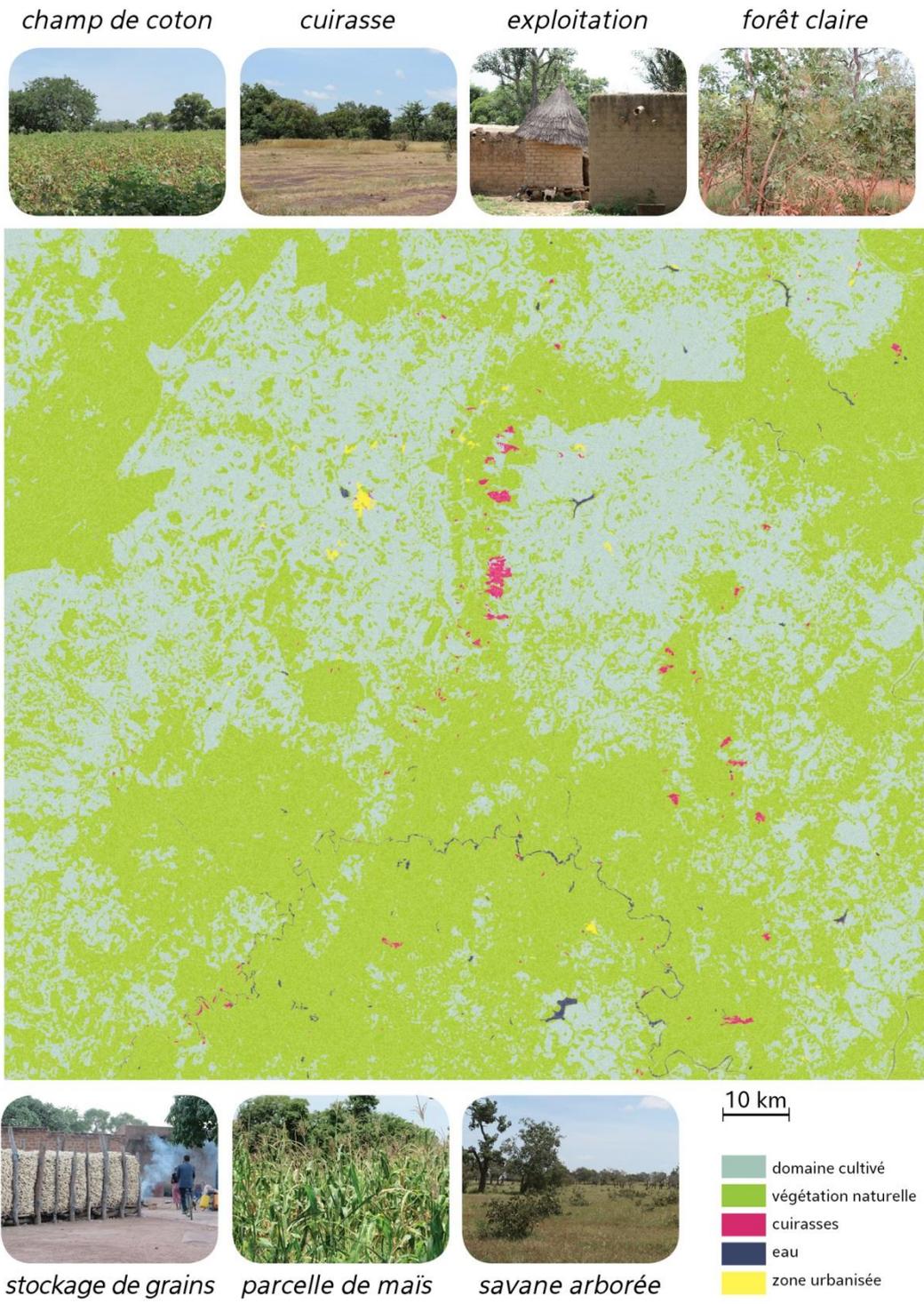


Figure 12: Occupation et utilisation du sol de la zone du Tuy. (Carte dérivée d'images Landsat 2014, photographies Jahel).

Deux cultures dominent largement le paysage : le maïs et le coton, chacune représentant environ 25% des espèces cultivées. Les 900 mm de pluie annuels sont effectivement favorables à la culture de maïs, exigeante en eau et pouvant être pratiquée sur des sols profonds (supérieur à 1 m). Très demandeur en nutriments, le maïs est en général mis en rotation avec le coton et profite ainsi des résidus de fertilisants apportés au coton. Le sorgho (15% des cultures) et le mil (5%) sont les autres céréales majoritaires de la zone (données AGRHYMET). Etant moins exigeantes en nutriments et en eau, elles peuvent être cultivées sur les sols pauvres et peu profonds. Les dernières années ont vu une augmentation des proportions des surfaces allouées au sésame, seconde culture de rente avec le coton. Enfin, environ 10% des assolements hors jachère sont alloués aux légumineuses, majoritairement arachide et niébé, bien qu'une partie puisse aussi être faite sur les champs familiaux. Les légumineuses sont en général cultivées par les femmes. Les parcelles de cultures sont jalonnées d'arbres fruitiers, dont le karité, permettant ainsi de diversifier l'alimentation et d'augmenter les revenus. On trouve aussi dans le nord de la zone, autour du village de Boni, des parcs à Acacia Albida, témoins anciens d'une importante activité d'élevage, et aujourd'hui toujours utilisés pour nourrir le bétail en période de soudure. De manière marginale, les bas-fonds sont souvent utilisés pour le riz et les cultures maraîchères.

En général, la courte saison des pluies ne permet pas de faire deux cultures successives, bien que certaines parcelles de maïs précoce puissent être ensuite emblavées en pastèque dans de rares cas. Le travail est majoritairement réalisé par traction attelée. 20 % des exploitations de la zone ne possèdent pas d'équipement et pratiquent de l'agriculture manuelle. Quelques grandes exploitations ont acquis un ou plusieurs tracteurs, mais elles ne représentent que 1% des exploitations (Données Sofitex).

La figure 13 présente le calendrier cultural adopté pour le coton, le maïs et le sorgho.

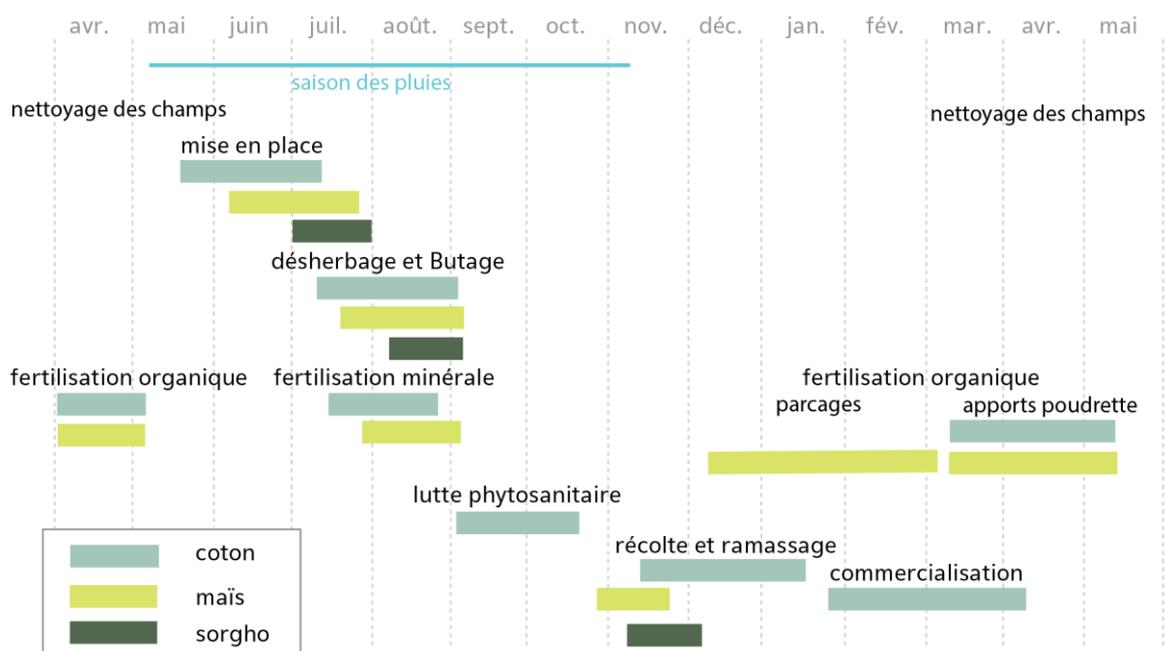


Figure 13 : calendrier cultural (CIRAD-CIRDES-UPPCT-INADES, 2008).

D'après une typologie élaborée par Marre-CAST et Vall (2013) par traitement statistique d'enquêtes réalisées auprès de 40 agriculteurs de la zone, il est possible de distinguer 6 systèmes de production. La plupart des valeurs énoncées sont issues d'un traitement fait à partir des données brutes d'enquêtes fournies par Marre-CAST et Vall (2013).

- Les « agriculteurs » (A) : ils représentent plus de la moitié des exploitations de la zone. Ce sont les exploitations majoritairement tournées vers l'activité culturale, et ayant une activité d'élevage bovin marginale voire inexistante.
Deux groupes se distinguent par leur surface d'exploitation : ceux (A1) ayant moins de 10 hectares, sont en général de petites familles nucléarisées (avec en moyenne 8 personnes à charge) qui ne possèdent pas d'équipement ou seulement un équipement léger.
Les autres (A2) ayant plus de 10 hectares sont souvent de grandes familles profitant d'une importante main d'œuvre familiale et ayant pu investir dans de l'équipement lourd (une ou plusieurs charrues avec souvent une à trois paires de bovins).
Les deux groupes réservent en général 30 à 40% de leur assolement aux céréales et environ 30% au coton. Dix à quinze autres pourcents sont destinés aux cultures secondaires (arachide, niébé, pois, riz...). Les systèmes de production « agriculteurs » sont ceux qui ont le plus souvent recours à la jachère, soit pour renouveler la fertilité du sol faute d'intrants suffisants, soit du fait du manque de main d'œuvre et de matériel qui serait nécessaire à l'emblavement d'une surface plus importante.
- Les agro-éleveurs (AE) : avec un troupeau supérieur à 10 bovins, ils se distinguent par leur activité mixte d'élevage et d'agriculture. Ce sont majoritairement de grandes familles, avec un nombre moyen de 30 personnes à charge par exploitation. Ils ont en général très peu recours à la jachère.
Les exploitations les plus petites (AE1) ont entre 7 et 15 hectares et possèdent un cheptel d'environ 20 têtes de bovins. Elles possèdent un équipement lourd qui leur permet d'avoir une productivité du travail importante. Les céréales représentent la moitié de leur assolement, 30 autres pourcents sont en général emblavés en coton et 13 autres pourcents sont dédiés aux cultures secondaires.
Les agroéleveurs possédant plus de 15 hectares (AE2) sont les grandes familles qui ont pu acquérir un tracteur. Plus de 60 % de leur assolement est dédié au coton.
- Les éleveurs (E) : la plupart appartiennent à l'ethnie Peuhl, leur activité principale est l'élevage. Ils possèdent quelques parcelles de cultures, principalement vivrières. La distinction entre deux types d'éleveurs est faite en fonction de la taille du cheptel, inférieure (E1) ou supérieure (E2) à 30 têtes.

L'étude effectuée par Marre-Cast et Vall (2013) a permis de déterminer les principales caractéristiques structurelles des différents types de systèmes de production, ainsi que les informations concernant leurs itinéraires techniques et les rendements moyens obtenus (tab.2).

Table 2 : caractéristiques des différents types d'agriculteurs (Marre-Cast et Vall, 2013)

	Agriculteurs		Agro-Eleveurs		Eleveurs	
	A1	A2	AE1	AE2	E1	E2
Surface cultivée (ha)	4.6	12	23.2	36	4.3	5
Personnes à charge	8	22	29	30	13	25
Valeur du matériel agricole	312	855	1500	6738	446	686
Fumure organique/Surface totale cultivée de l'exploitation (Kg /ha)	540	531	382	272	1134	922
Fumure Minérale (Kg/ha)	86	117	115	135	54	62
Rendements maïs (Kg/ha)	1269	1543	1382	2324	1081	1383
Rendements coton (Kg/ha)	905	941	1205	1277	1061	1299

2.3. Une histoire agraire particulière, construite autour du cotonnier

L'organisation de l'agroécosystème actuel résulte de l'histoire agraire passée. Cette partie contribue à dessiner ces principales évolutions en mettant l'accent sur le développement de la filière coton, à l'origine des mutations majeures de la zone.

2.3.1. Les années de colonisation : échecs successifs de l'instauration de la culture de coton

Lorsque les colons arrivent au Burkina, en 1919, la province du Tuy est majoritairement recouverte de forêts, avec sur les hauteurs et plateaux quelques villages bwabas. Les parcelles de cultures sont cultivées manuellement et collectivement par de grandes familles pouvant rassembler entre 50 et 100 personnes. Ces parcelles sont réparties entre champs de case, champs de brousse, parcelles de bas-fonds. Les champs de case entourent le village, et sont majoritairement utilisés pour planter des céréales en association (sorgho-maïs), cultivées manuellement et collectivement par de grandes familles. Ces parcelles sont fertilisées avec les déchets organiques ménagers et issus des animaux (petits ruminants), ce qui permet une mise en culture continue. Sur les champs de brousse, situés plus loin du village, les cultures sont itinérantes. Après abattis-brûlis, la terre est cultivée quelques années avec majoritairement des associations maïs-sorgho-mil suivies de légumineuses, i.e. niébé et arachide, puis elle est laissée au repos 20 à 30 ans avant d'être reprise. Le cotonnier est déjà présent mais de manière marginale, chaque case ayant quelques rangs, la fibre de coton étant ensuite filée et tissée en vêtements (Schwartz, 1997). Les parcelles de bas-fonds, plus difficiles à cultiver, sont en général emblavées avec du riz (Bainville et Dufumier, 2009 ; Tersiguel, 1995 ; Serpantié, 2003).

Les colons voient en la Haute-Volta (nom du Burkina-Faso avant l'indépendance) une opportunité importante de production et d'exportation de coton. Dès 1924, des mesures sont prises pour rendre la culture du cotonnier obligatoire. Plusieurs tentatives sont faites, sans succès (Schwartz, 1997). La première visait à instaurer un champ collectif villageois et la seconde consistait en un impôt de capitation pour chaque homme marié. Ces deux mesures se soldent par un échec et ont comme conséquence l'émigration de nombreux paysans vers le Ghana où le régime britannique est moins sévère. L'autre résultat de ces mesures est

certainement la naissance de mésententes au sein des familles et d'aspirations à l'individualisation de la part des jeunes exilés, menant aux toutes premières divisions des grandes familles en foyers plus petits. Cette nucléarisation progressive des familles va s'accroître entre les années 50 et 60, poussée par « l'élargissement de l'espace social » (Savonnet, 1986) ; qui rapproche les jeunes d'autres populations et de la ville. En 1965, la grande majorité des jeunes des villages cultivent un champ de manière individuelle.

Ce n'est qu'à partir des années 50 que la culture du cotonnier est relancée, cette fois-ci prise en main par une société économiquement mixte, la Compagnie Française des Textiles (CFDT). L'entreprise débute alors un programme de vulgarisation agricole, de manière très organisée, en créant plusieurs secteurs géographiques eux-mêmes divisés en centres cotonniers. Les premiers essais de promotion de nouvelles méthodes et variétés de coton sélectionnées n'ont pas plus de succès que les campagnes de promotion précédentes (Schwartz, 1997). A partir de 1952, l'entreprise met en place un système de rémunération attractif, qui aboutit finalement à la conversion de plusieurs producteurs. Ce système est basé sur une annonce du prix d'achat au producteur avant la saison, un prix attractif, unique sur tout le territoire, maintenu stable durant la campagne et d'une année à l'autre (Fok, 2006). C'est à partir de ce moment que les surfaces en coton commencent à augmenter. Cette augmentation est faible au début, faute de moyens de l'entreprise pour transporter les récoltes jusqu'à l'usine d'égrenage (la plus proche étant à Bobo-Dioulasso).

Après l'indépendance, la CFDT garde le monopole de la filière cotonnière quelques années avant de le céder à la Société Des Fibres Textiles (SOFITEX) en 1979. Des Organismes Régionaux de Développement (ORD) sont en même temps chargés par le gouvernement d'organiser l'encadrement agricole (Schwartz, 1997). C'est autour de cette période que la production de coton commence à prendre de l'ampleur dans la province du Tuy.

2.3.2. Années 70-80, entre boom cotonnier et boom démographique

L'objectif premier de la SOFITEX est la promotion de techniques permettant d'augmenter les rendements des cotonniers, sans empiéter sur les cultures vivrières.

Tout un package technique est donc introduit auprès des producteurs. Des variétés améliorées de cotonnier sont accompagnées de méthodes culturales particulières à l'aide tout d'abord des sarclos-bineurs tractés, couplés au semis en ligne. La culture sur friche est progressivement abandonnée, les outils tractés n'étant pas compatibles avec la présence de souches sur les parcelles.

L'introduction d'engrais de synthèse, doublée de l'utilisation des déjections bovines pour renouveler la fertilité des sols ont donc été nécessaires pour prolonger les années de cultures d'une parcelle et ainsi réduire le besoin en friches. Les agriculteurs commencent alors à se doter de quelques bovins et à diminuer la durée de la jachère (Tersiguel, 1995 ; Milleville et Serpantié, 1994).

L'introduction de l'engrais combiné d'une rotation coton-céréale est responsable de l'engouement rapide des agriculteurs pour la culture du coton. Des résidus de l'engrais utilisé pour le coton restent dans le sol après la récolte et profitent aux cultures vivrières l'année suivante, responsables d'une augmentation de leurs rendements de 30 à 40% (Savonnet, 1986).

Des variétés à cycle court de maïs et de sorgho sont proposées par les ORD, permettant ainsi de répartir les charges de travail sur la saison sans faire concurrence au cotonnier.

La Caisse Nationale de Crédit Agricole est créée en 1980, et propose des prêts aux producteurs pour accéder à ces nouvelles technologies, grâce à un système de caution solidaire de Groupements Villageois (GV) (Schwartz, 1997). Cela va permettre aux agriculteurs de rapidement se procurer des équipements attelés plus performants, comme la charrue, les sarclours et les butteurs qui vont amplement contribuer à diminuer la charge de travail liée à la lutte contre les adventices. La charrue attelée va aussi permettre de travailler les sols lourds de bas glacis, ouvrant une possibilité d'extension des cultures à des terres plus fertiles que les sols gravillonnaires des plateaux. La production se déplace des champs de case vers les champs de brousse. (Tersiguel, 1995)

En revanche, les pics de travail de la culture du coton interfèrent avec ceux des cultures de bas-fonds (igname et taro), menant à l'abandon progressif de ces dernières et libérant ainsi les bas-fonds pour disposer de ressources fourragères en saison sèches pour les troupeaux grandissants. Les associations culturales sont elles aussi délaissées, rendues difficiles par le semis en ligne.

Cette période de bouleversements agricoles se solde par une forte croissance des rendements et une multiplication par 3 de la productivité du travail (Bainville et Dufumier, 2009).

Avec l'abandon des cultures sur les terres gravillonnaires de haut glacis et la libération des bas-fonds pour les ressources fourragères, les éleveurs peuhls peuvent installer leurs campements sur les terres de haut glacis, en périphérie des villages, les déplaçant vers les bas-fonds en période sèche. Leur présence permet aux agriculteurs de bénéficier d'importants apports en fumure, les bêtes parquées sur les parcelles durant la saison sèche se nourrissant des résidus de culture.

La période est aussi marquée par l'arrivée massive de populations provenant du plateau Mossi au Nord du Burkina, à l'origine d'une rapide croissance démographique. Deux principales vagues de migrations ont lieu, suite à deux périodes de sécheresse dans les années 1970 et 1980 (Augusseau, 2007). Les migrations sont accentuées par l'abandon des programmes d'aide gouvernementale au développement dans ces régions du Nord, jugées peu productives du fait de sécheresses récurrentes (Rémy, 1981) poussant de nombreuses familles à s'installer plus au Sud, dans des régions plus accueillantes. Les migrants mossis sont au début accueillis sans difficultés par les villages locaux, présentant une force de travail supplémentaire et contribuant au recul de la forêt et de ses dangers (animaux sauvages). Ils sont en général placés en périphérie des villages, sur les terres les moins fertiles (Serpantié, 2003). Rapidement, les nouveaux arrivants ne demanderont plus aux autochtones l'autorisation de s'installer et rejoindront les camps déjà installés, étendant les surfaces cultivées au-delà des limites octroyées. Certains villages peu enclins à accueillir les migrants mossis (Boni, Wakuy, Boho-Kari) préfèrent les installer sur leur propres blocs de culture de manière à les surveiller et à limiter leur étalement (Savonnet, 1986).

A la fin des années 90, la province du Tuy accueille une population ayant triplé en 20 ans, et majoritairement tournée vers la culture du coton en rotation avec du maïs et du sorgho. Cette période est caractérisée par la colonisation de « terres neuves », boostée par la généralisation de la mécanisation et la croissance démographique (Tersiguel, 1995).

Les baisses de prix du coton fibre sur le marché international ont néanmoins engendré des situations d'endettement chez les groupements villageois et des défauts de paiement à la SOFITEX ou la CNCA. Les Groupements Villageois (GV) sont donc remplacés par des

Groupement de Producteurs de Coton (GPC), rassemblant seulement les paysans cultivant au moins 6 ha de coton, pour éviter qu'un trop fort endettement entre paysans ne mène à l'abandon de la culture. Les crédits ne sont dorénavant explicitement consentis qu'aux producteurs de coton. (Bainville et Dufumier, 2009)

2.3.3. Depuis les années 2000, période étudiée

Les dynamiques agraires ayant eu lieu à partir des années 2000 font l'objet de cette thèse, et seront détaillées dans le chapitre 4. Nous pouvons néanmoins tracer rapidement ici les évolutions majeures de cette période.

Si l'ampleur des migrations a été ralentie à partir des années 2000, la population n'a néanmoins pas cessé de croître (fig. 14). Le domaine cultivé s'est lui aussi étendu, aux dépens des forêts, aujourd'hui réduites à des enclaves. Si les espaces de parcours ont peu à peu diminué (Diallo et Vall, 2010), la période voit l'émergence de l'agro-élevage, les agriculteurs ayant pu capitaliser dans un troupeau, les activités d'agriculture et d'élevage sont de moins en moins réparties entre agriculteurs et éleveurs (Augusseau, 2007 ; Vall et al., 2006).

Un nombre croissant de familles a pu acheter des tracteurs à crédit, via l'union des producteurs de coton. Mais la filière coton connaît de gros essoufflements, liés d'abord à une baisse des prix sur les marchés internationaux et ensuite au besoin grandissant en engrais et pesticides. En effet, les attaques des ravageurs se sont multipliées et l'apparition de résistances à certains produits a nécessité une multiplication des doses d'insecticides par 3 à 4 (Bainville et Dufumier, 2009). L'introduction du coton transgénique en 2008 a eu assez peu d'effets (Dowd-Urbe, 2014). La diminution de la jachère, n'a été compensée que partiellement par les engrais chimiques et organiques, ce qui a conduit à une baisse de la fertilité des sols et provoqué une diminution des rendements (fig. 15).

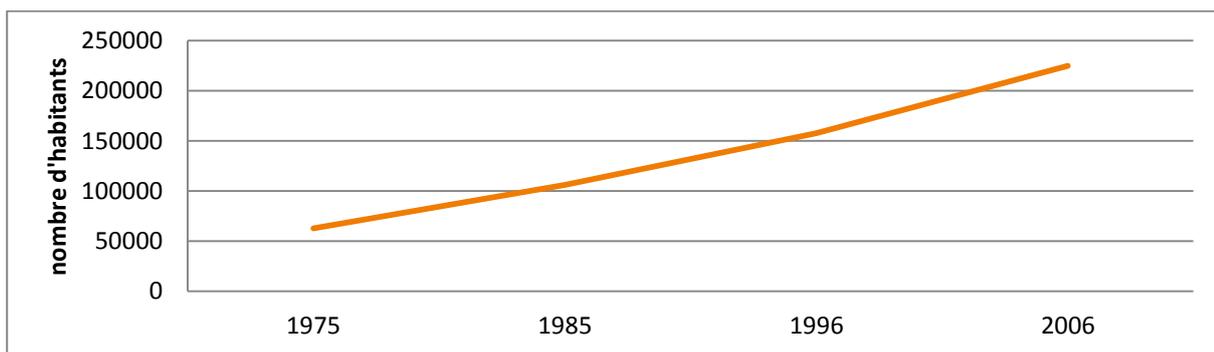


Figure 14 : Evolution de la population de la province du TUY (RGPH 1975, 1985, 1996 et 2006)

La SOFITEX a connu une forte restructuration : privatisée et divisée en trois sociétés cotonnières en 2004 (SOFITEX, SOCOMA et FASOCOTON) se répartissant les bassins cotonniers du Burkina. Ces dernières années ont vu la diminution des surfaces en coton, voire

l'abandon par certains producteurs encore minoritaires. L'introduction du sésame dont la filière est de mieux en mieux structurée fait concurrence au coton depuis les années 2012.

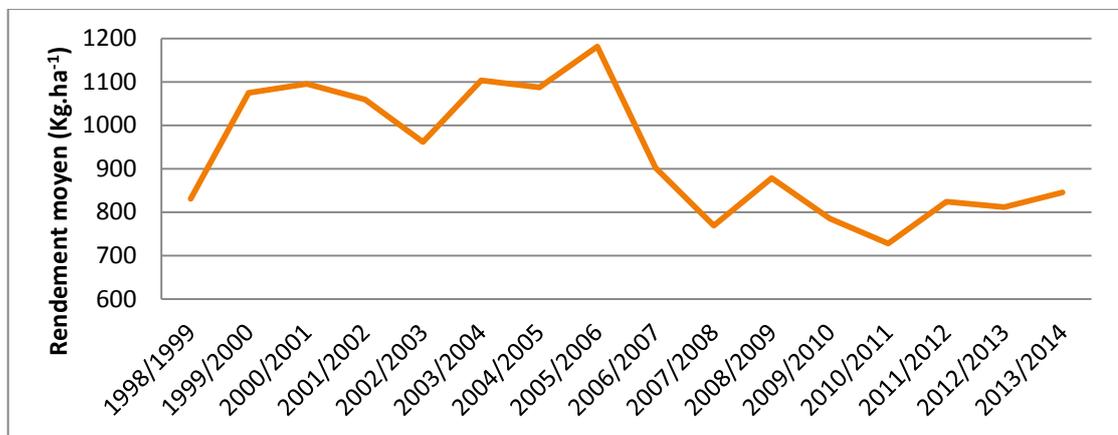


Figure 15 : Evolution des rendements de coton (données Sofitex).

Enfin, ces dernières années ont vu une augmentation importante des conflits entre éleveurs et agriculteurs, la plupart du temps liés à des problèmes d'accès partagé aux ressources: l'expansion du domaine cultivé s'est faite aux dépens des parcours et des pâturages, rendant de plus en plus difficile la conduite des troupeaux par les éleveurs (Vall et al., 2006). La pénurie de ressource en terre provoque aussi la multiplication des tensions entre anciens migrants et autochtones.

Chapitre III :
De la parcelle à la région,
modélisation spatialisée
et multiscalaire
des dynamiques
des agroécosystèmes



Chapitre III :

De la parcelle à la région, modélisation spatialisée et multiscalaire des dynamiques des agroécosystèmes

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats obtenus sur la possibilité de changer d'échelle en modélisation, pour lier la production du sol à son occupation/utilisation. Nous partons du postulat que les éléments et sous-systèmes d'un agroécosystème issus d'échelles différentes sont inter-corrélés. La compréhension fine des dynamiques de l'agroécosystème doit se faire en tenant compte de cette multiscalarité. Or, nous avons vu au chapitre I que les modèles ne s'intéressent en général qu'à une partie de l'agroécosystème avec d'un côté les modèles de culture (production du sol) et de l'autre les modèles de dynamiques de paysages (occupation et utilisation du sol). La modélisation de tous les aspects de l'agroécosystème se fait en général par couplage de modèles, qui engendre une déformation de l'information liée aux méthodes d'agrégation employées pour passer d'une échelle à l'autre.

Pour mémoire, notre questionnement était le suivant : **Comment effectuer un transfert d'échelle pour documenter les dynamiques agraires sur une large zone, en partant de l'échelle de la culture jusqu'à l'échelle régionale ? Plus précisément, comment intégrer dans un modèle des éléments, processus et facteurs interagissant et issus d'échelles différentes?**

Pour répondre à ces questions nous utiliserons un outil de modélisation récemment développé : la plateforme Ocelet (Degenne et Lo Seen, 2016).

Dans ce chapitre, nous positionnons tout d'abord Ocelet par rapport aux méthodes actuelles sur la modélisation des dynamiques des agroécosystèmes, et montrons son intérêt pour ce qui concerne les questions d'échelle. Puis nous présentons le travail réalisé sous forme d'article scientifique, au préalable résumé en français. La première partie de l'article consiste en une présentation succincte des dynamiques principales de la province du Tuy, de leurs facteurs déterminants et des échelles en jeu. La seconde partie restitue l'étape de construction du modèle reconstituant ces interactions multiscalaires à l'aide de la plateforme de modélisation Ocelet. Différentes simulations sont ensuite décrites, qui ont permis d'évaluer l'impact de la prise en compte d'une diversité d'échelles pour l'étude d'un phénomène ayant lieu à une échelle donnée.

Ce chapitre est complété par l'Annexe 1 qui détaille les équations et paramètres du modèle.

1. Idée générale : utilisation des graphes d'interaction entre échelles

1.1. Ocelet, une approche par graphes d'interaction

L'environnement Ocelet a été conçu pour formaliser des connaissances sur des processus spatiaux et leurs dynamiques. C'est un langage métier accompagné d'une plateforme de modélisation dédiée à la simulation de dynamiques spatiales (Degenne, 2011). Son originalité réside dans l'utilisation des graphes d'interaction pour modéliser les liens entre éléments spatiaux. Dans l'approche Ocelet, un système (dans notre cas l'agroécosystème) est représenté par des graphes d'interaction. Dans un graphe d'interaction chaque sommet est l'une des composantes du système (par exemple les systèmes de production, les systèmes de culture, les villages). Les liens entre sommets sont appelés arêtes. Les arêtes portent ici les interactions entre les composantes du système. Les arêtes reliant deux éléments du système contiennent une série de fonctions décrivant les modalités d'interaction de ces éléments. Plus précisément, le langage Ocelet se base sur trois concepts : celui d'« entité », celui de « relation » et le « scénario ».

- Les entités sont les sommets du graphe. Elles possèdent des propriétés qui caractérisent leur état, et des services qui sont des fonctions permettant de donner des informations sur les propriétés ou de les modifier. Les entités interagissent entre elles via le concept de relation.
- la relation décrit un ensemble d'arêtes entre deux formes d'entités et sert de support à la structure du système (qui est en lien avec qui). La relation porte aussi une partie de la sémantique de ce système, c'est à dire la nature des liens entre les entités, via les fonctions d'interaction. C'est à partir de la définition d'une relation que l'on peut construire un ou plusieurs graphes d'interaction conformes à cette définition.
- Enfin, le scénario représente la dynamique du système. C'est la phase opérationnelle du modèle puisqu'il décrit l'état initial des entités puis appelle les fonctions d'interaction dans un certain ordre, faisant ainsi évoluer l'état du système.

D'autres éléments s'ajoutent à ces trois concepts, notamment les « datafacers » qui permettent d'intégrer des données extérieures au modèle, notamment des données spatialisées (Degenne, 2011).

1.2. Positionnement par rapport aux autres approches

Nous avons vu au chapitre I que les modèles de dynamiques des agroécosystèmes se différencient selon leur type d'approche : descendante, ascendante ou « autre ». Par son approche basée sur les graphes d'interaction, Ocelet marie les approches descendantes et ascendantes puisque les interactions entre entités peuvent s'effectuer dans les deux sens selon le système décrit. L'approche Ocelet serait donc classée dans la catégorie « autre », ne s'apparentant pleinement à aucune des deux approches. Dans les modèles Ocelet la sémantique décrivant les processus est principalement portée par les liens d'interaction entre des individus et non par les individus eux-mêmes. Pour être plus concret, prenons l'exemple de la comparaison avec un modèle multi-agent. Ce dernier est centré sur les agents qui évoluent dans leur environnement, qu'ils ont la capacité de modifier, comme celle d'y prélever des informations pour agir en conséquence. Les actions sont donc issues du comportement individuel des agents. Avec Ocelet, les individus et l'environnement sont des entités, et c'est une description davantage systémique que l'on construit, puisque les actions sont attachées aux arêtes d'un graphe reliant les entités. Notons néanmoins que le langage métier Ocelet donne une grande liberté au modélisateur qui peut décider de décrire un modèle « à la manière multi-agents » s'il le souhaite, s'éloignant ainsi de l'idée de départ de l'approche Ocelet.

La seconde spécificité d'Ocelet, qui le démarque des autres approches, est sa gestion de l'information spatiale. La majorité des autres modèles a recours aux grilles de cellules ou à un couplage avec les systèmes d'information géographique pour représenter l'espace. Ocelet combine les deux (Castets, 2015) en permettant via les datafacers l'intégration de données vecteurs et rasters. Les éléments spatiaux contenus dans les vecteurs et rasters deviennent des entités d'Ocelet, qui vont donc pouvoir interagir et évoluer avec le temps. Les relations permettent de décrire des processus entre éléments d'une couche vecteur, ou entre cellules d'un grille de raster, mais aussi entre raster et vecteur, ou enfin avec d'autres entités ne possédant pas nécessairement de représentation spatiale (un groupement d'agriculteurs par exemple).

1.3. Intérêt de l'approche Ocelet pour le changement d'échelle

La modélisation à base de graphes d'interaction présente l'intérêt de lier des éléments issus d'échelles différentes, ce qui va nous permettre d'opérer les changements d'échelle aujourd'hui problématiques dans le domaine de la modélisation. Pour être plus concret, prenons l'exemple d'un système de production simplifié, constitué de trois types d'éléments en interaction : l'exploitation, les parcelles de cultures et les animaux (fig.16). Les trois types de sommets du graphe, les entités, seront donc les entités « exploitation », « parcelle » et « animaux ». Les entités sont reliées entre elles par trois types de relations : la relation « exploitation-parcelle », la relation « exploitation-animaux » et la relation « animaux-parcelle ». Chaque relation contient plusieurs fonctions, appelées interactions. Par exemple, la relation « exploitation-parcelle » peut contenir une interaction décrivant l'action de semis, une autre l'action d'irrigation et encore une autre l'action de récolte. La relation « animaux-parcelle » contient l'interaction d'apport de matière organique par les animaux ou l'interaction de prélèvement des résidus culturaux par les animaux. Si les interactions sont appliquées, les entités liées

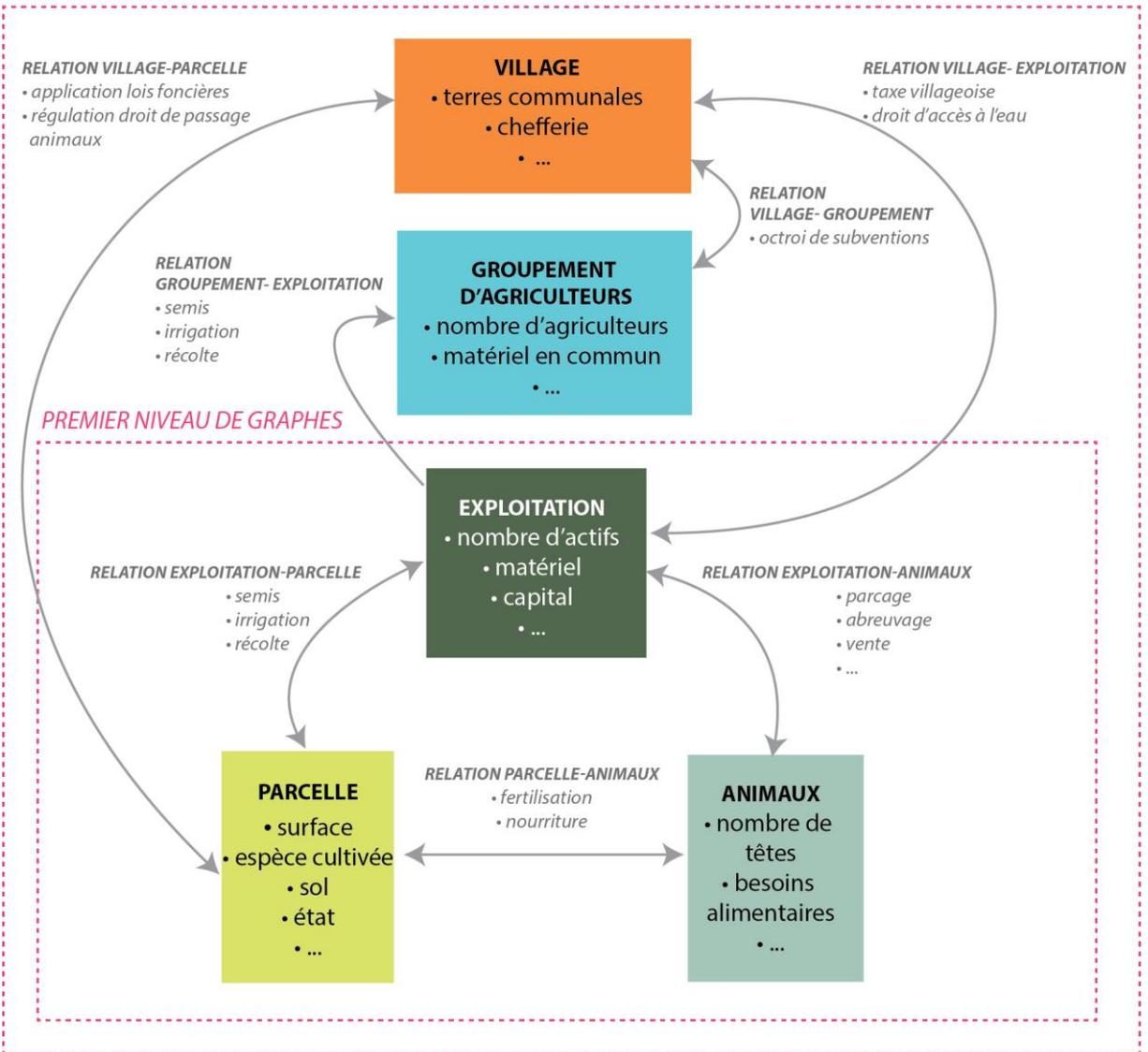
verront changer certaines valeurs des propriétés les caractérisant. Ainsi, après l'interaction « récolte » de la relation « exploitation-parcelle », la parcelle ne contiendra plus que des résidus (la propriété « occupation du sol » passera de « culture » à « résidus ») et l'exploitation aura la récolte stockée (la propriété « grenier » passera de « vide » à « rempli »).

Cet exemple a montré comment est modélisé un système simple avec l'approche Ocelet. Nous avons vu qu'un agroécosystème était constitué de nombreux sous-systèmes faisant intervenir des éléments issus de différentes échelles. L'approche Ocelet va permettre une intégration de ces sous-systèmes en liant directement les éléments des différents sous-systèmes entre eux, grâce aux graphes d'interaction. Ainsi, nous pouvons imaginer que le système présenté ci-dessus s'intègre lui-même dans un système plus vaste, où l'exploitation appartient à un village et à des groupements paysans. Les graphes originaux vont donc être enrichis par d'autres entités et interactions, et coexister avec des graphes plus larges (figure 16). Par exemple, deux nouvelles entités vont apparaître : l'entité « village » et l'entité « groupement d'exploitations ». Si l'entité « village » va être reliée à l'entité « exploitation », elle va aussi être reliée à l'entité « parcelle ». Les relations « village-exploitations » pourront contenir des interactions liées au statut social de l'exploitant, et les relations « village-parcelle » auront des interactions de type règles foncières variant en fonction des villages.

Avec une autre approche que l'approche d'Ocelet, ce type d'imbrication de systèmes est réalisable mais le plus souvent les systèmes sont modélisés indépendamment les uns des autres, les sorties des modèles de certains systèmes étant ensuite réinjectées dans un autre modèle. Ocelet permet quant à lui d'imbriquer les systèmes en reliant directement leurs différentes composantes entre elles, quelles que soient leurs échelles.

Ainsi, Ocelet est un outil adapté à la modélisation d'un agroécosystème complexe qui englobe plusieurs sous-systèmes à des échelles différentes et reliés entre eux par des différents types d'interactions. Les possibilités offertes par l'outil pour manipuler l'information spatiale vont nous permettre d'appréhender l'agroécosystème dans le temps comme dans l'espace à travers plusieurs échelles. Nous pourrons ainsi lier les dynamiques de culture (production du sol) avec des dynamiques spatiales (couverture et utilisation du sol).

SECOND NIVEAU DE GRAPHES



↔ Graphe

Figure 16 : Schéma des graphes d'interaction pris en exemple pour illustrer l'utilisation d'Ocelet.

2. Résumé de l'article : *modélisation spatiale des dynamiques des agroécosystèmes à travers plusieurs échelles : un cas d'étude dans la région cotonnière de l'ouest du Burkina Faso*

Le présent article traite de la problématique du changement d'échelle au sein des modèles de dynamiques des agroécosystèmes. Il présente un modèle, développé au moyen de la plateforme Ocelet, comme exemple des possibilités offertes par les graphes d'interactions pour lier des éléments et processus issus de différentes échelles. Le modèle est ensuite testé au regard de différentes problématiques, afin d'explorer le champ des possibles offert par cet outil.

2.1. Méthode

L'objectif du modèle est de simuler les dynamiques agraires observées au sein de la province du Tuy pendant ces 15 dernières années, en tenant compte des différents niveaux d'organisation impliqués.

Le modèle met en jeu quatre types d'entités : l'entité « champ », l'entité « parcelle », l'entité « exploitation » et l'entité « climat » ; une phase préalable ayant permis la création de ces entités à partir d'un shapefile de la structure du parcellaire en 2000, issu d'images de télédétection.

Trois relations relient respectivement les entités : « climat – champ », « champ – exploitation », « parcelle-exploitation » (fig. 17).

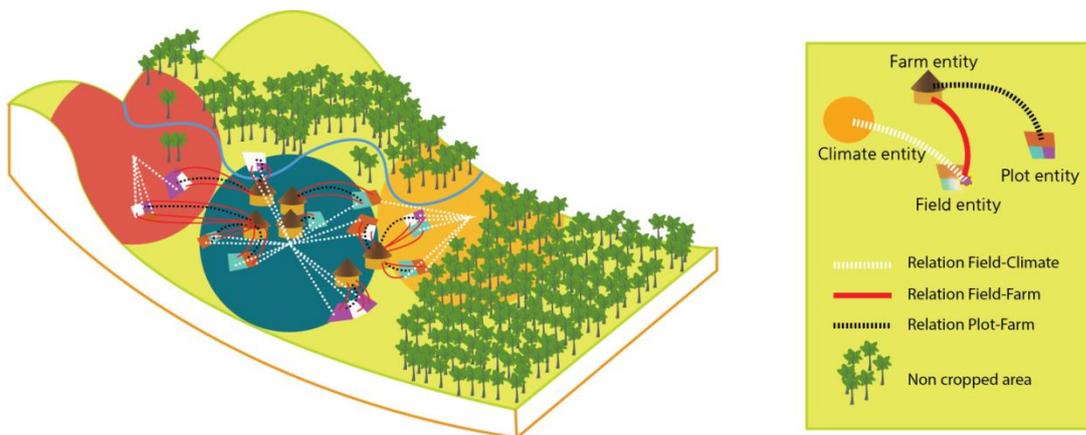


Figure 17 : Entités et relations structurant le modèle.

Dans le scénario, les relations interviennent pour simuler 3 dynamiques, avec différents pas de temps : i) l'extension du domaine cultivé, et ii) la création des assolements, dans une boucle annuelle ; iii) le développement biophysique des cultures, dans une boucle journalière (fig. 18).

i) l'extension du domaine cultivé de la province du Tuy :

Pour simuler ce premier phénomène, trois processus sont à l'œuvre :

Chaque année, une partie des exploitations est sélectionnée afin que lui soit attribué un changement de surface (agrandissement ou réduction), lequel diffère en fonction de la taille et du type (agriculteurs, agro-éleveurs ou éleveurs) des exploitations. Le taux d'évolution pour chaque surface est choisi aléatoirement dans un éventail de valeurs variant pour chaque type d'exploitation, comme décrit par Marre-Cast et Vall (2013). On obtient l'augmentation de la taille en ajoutant à l'exploitation des parcelles en friche, jusqu'à ce que la surface visée soit atteinte. Les nouvelles parcelles sont choisies au sein de la liste des parcelles en friche, en fonction de leur localisation, de leur pente, du type de sol et de leur appartenance à une zone protégée. Dans le cas d'une diminution de la taille de l'exploitation, les parcelles sont retirées à l'exploitation et remises en friche.

Un second processus est simulé : la division par héritage ou la disparition des exploitations. Chaque année une partie des exploitations est choisie au hasard pour être divisée ou, en l'absence d'héritiers, être amenée à disparaître. Quand une exploitation est divisée, les parcelles de la ferme d'origine sont partagées entre deux ou trois enfants. Les nouvelles exploitations ainsi créées voient leurs types choisis en fonction de leur superficie totale et du type de l'exploitation mère. Quand une exploitation disparaît, ses parcelles deviennent des friches.

Le dernier processus simulé est la création de nouvelles exploitations. Dans chaque village, un certain nombre d'exploitations sont créées, en fonction de l'arrivée de migrants et de la croissance naturelle de la population. Elles sont constituées de parcelles en friche dont le choix dépend de leur localisation et propriétés.

ii) la création des assolements :

Au niveau de l'exploitation, les assolements sont construits annuellement, en plusieurs étapes, dans le modèle. Tout d'abord, l'exploitant rassemble les informations auxquelles il a accès (internes ou externes à l'exploitation). Il fait ensuite le choix des surfaces « théoriques » pour chaque espèce cultivée, en fonction de ces informations. L'étape suivante consiste à attribuer les différentes espèces aux parcelles, en tenant compte des propriétés de ces dernières (« sol », « surface », « antécédent cultural », etc.). Une dernière étape définit l'itinéraire technique de chaque champ.

iii) le développement biophysique des cultures :

Au niveau du champ, pour le maïs et le sorgho, les dynamiques culturales et le rendement sont estimés avec un pas de temps quotidien, en fonction des pratiques culturales, des conditions climatiques et des propriétés des sols. Le modèle de culture SARRA-H (Baron et al., 2003) a pour cela été réécrit en Ocelet, en utilisant les relations « champ-climat » et « champ-exploitation ». Chaque jour, les bilans carbonés et hydriques sont estimés en fonction du stade

phénologique de la culture. À la fin de la saison, il est ainsi possible d'estimer le rendement obtenu pour chaque champ de maïs ou de sorgho.

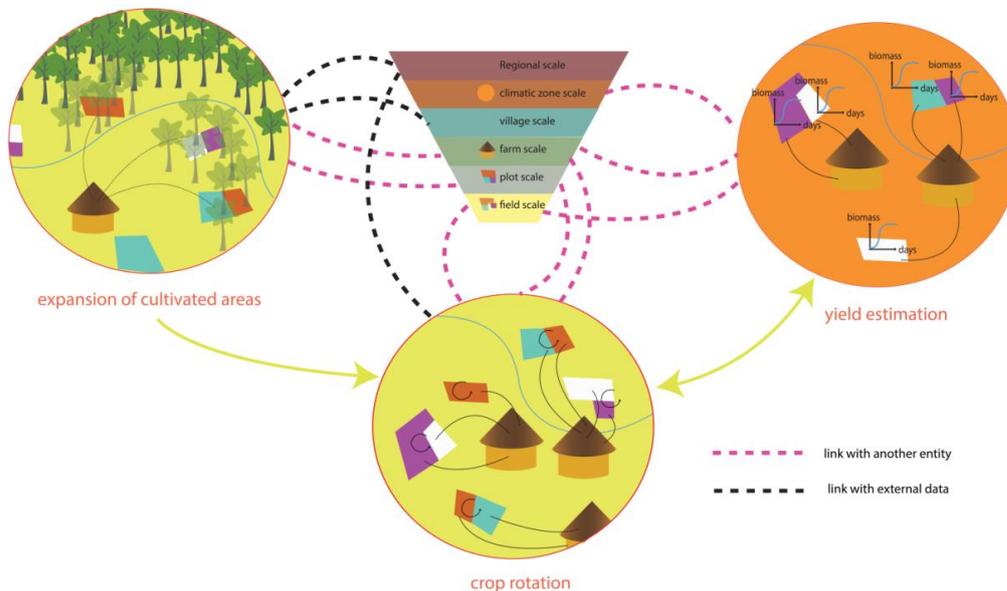


Figure 18: Les trois dynamiques modélisées et les échelles et niveaux d'organisation impliqués.

Plusieurs scénarios sont simulés. Le scénario de référence est celui qui reproduit le mieux les changements de paysages observés entre 2000 et 2015. Les scénarios alternatifs consistent à modifier des processus, des données d'entrées ou des paramètres, pour évaluer les effets de ces modifications.

2.2. Résultats

2.2.1. Présentation des sorties du modèle

Une validation a été effectuée en comparant d'une part les défriches simulées par le modèle aux cartes d'évolution de la végétation dérivées d'images Landsat, d'autre part les proportions des cultures simulées aux données de l'AGRHYMET, enfin les rendements obtenus par le modèle à ceux relevés sur le terrain en 2014.

Les sorties du modèle concernent trois échelles différentes décrites ci-après (fig.19). À l'échelle de la province, les évolutions du domaine cultivé sont exprimées par l'intensité des défriches entre 2000 et 2007. Les zones les moins impactées étant les zones protégées, les zones déjà cultivées et les zones ayant les terres les plus pauvres.

Au niveau de l'exploitation, le modèle simule les successions culturales. Les évolutions du domaine cultivé à l'échelle de la province y sont prises en compte chaque année, faisant évoluer le nombre de parcelles concernées par les assolements.

À l'échelle du champ, la sortie du modèle (fig. 19.c) prend la forme d'une carte des rendements simulés pour une saison. D'importantes variabilités de rendements sont observables au sein d'une même espèce, entre les différentes variétés (de 980 kg.ha⁻¹ à 5210 kg.ha⁻¹).

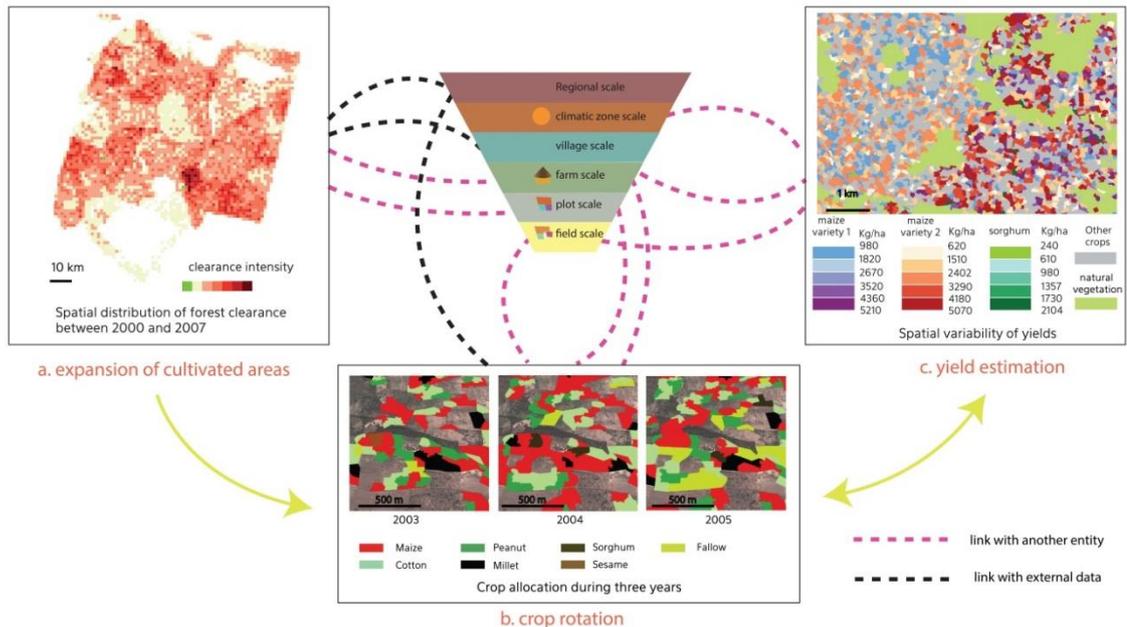


Figure 19: Sorties du modèle.

2.2.2. Scénarios alternatifs

Trois scénarios alternatifs ont ensuite été simulés pour illustrer la diversité des problématiques pouvant être explorées avec le modèle développé, et impliquant différentes échelles. Ils consistent à tester i) la répartition géographique des parcelles comme stratégie de réduction du risque climatique, ii) les stratégies d'assolements dans un contexte cotonnier saturé et iii) les conséquences de la diminution de l'accès au crédit pour les intrants.

i) La répartition géographique des parcelles comme stratégie de réduction du risque climatique.

Deux scénarios ont été comparés : le premier reproduit une stratégie de groupement des parcelles alors que dans le second, les exploitations dispersent leurs parcelles spatialement. Les valeurs de production de maïs par exploitation sont comparées entre les deux scénarios. Les résultats montrent que la variance des productions issues du premier scénario est élevée, contrairement au scénario 2 où les exploitations ayant dispersé leurs parcelles entre zones humides et zones sèches ont obtenu des productions proches d'une valeur moyenne (fig. 20). Cela illustre le fait que la stratégie de dispersion des parcelles diminue le potentiel de production mais réduit le risque de perte en cas de mauvaises pluies.

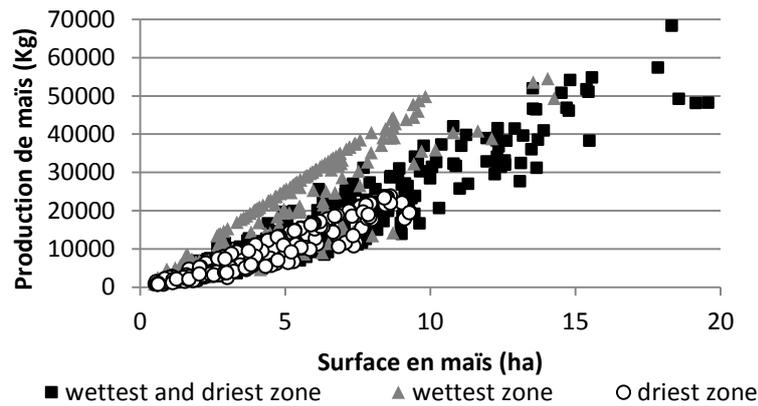


Figure 20: Production de maïs par exploitation (les résultats du scénario de dispersion des parcelles sont en noir, ceux du scénario de groupement des parcelles sont en blanc et gris).

ii) Les stratégies d'assolements dans un contexte cotonnier saturé

Deux scénarios ont été construits faisant varier les modalités de mise en jachère dans les assolements. Dans le premier scénario, 10% des exploitations ont recours à des jachères qui ne dépassent pas 5 ans, alors que dans le second la pratique de mise en jachère concerne 50% des exploitations et la durée moyenne des jachères est d'environ 12 ans. Les résultats montrent que les proportions de cultures vivrières dans les assolements varient peu d'un scénario à l'autre, alors que celles des cultures de rente diminuent (fig. 21). Cela s'explique par le fait que la priorité est donnée aux cultures vivrières, dont la famille dépend pour se nourrir.

On constate que les surfaces de coton diminuent sans pour autant disparaître. Cela s'explique par le fait que la compagnie cotonnière vend des intrants à crédit, dont une partie est destinée au maïs, à condition que soit cultivé aussi du coton. En conséquence, afin d'obtenir de bons rendements pour leurs cultures vivrières, les agriculteurs sont de fait obligés de conserver une part à la culture du coton dans leurs assolements.

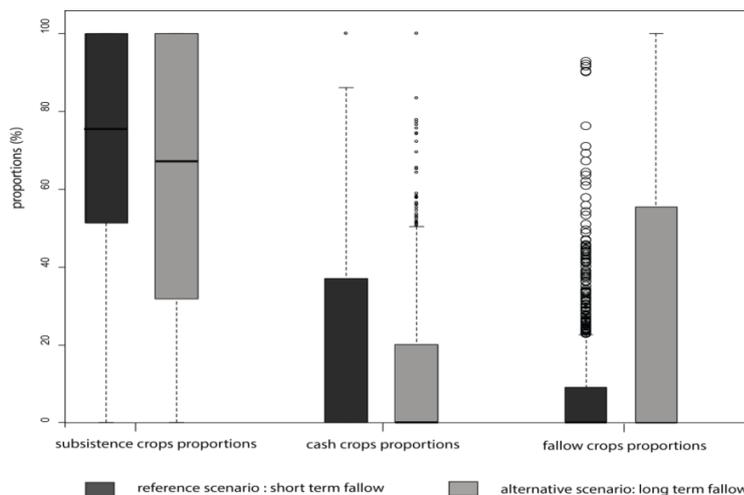


Figure 21: Comparaison des proportions de chaque groupe de cultures pour les deux scénarios (le scénario des jachères courtes en noir, celui des jachères longues en gris). Les cultures vivrières incluent les céréales, l'arachide, le niébé et le riz alors que les cultures de rente concernent le coton et le sésame.

iii) Les conséquences de la diminution de l'accès au crédit pour les intrants.

Un premier scénario reproduit la situation actuelle où la plupart des exploitations ont accès aux engrais à crédit en échange du coton, le paramètre « fertilisation » est donc élevé. Dans le second scénario, la compagnie ne donne plus d'accès au crédit, seules les plus riches exploitations peuvent se procurer des intrants. Le paramètre « fertilisation » est alors faible pour la plupart des exploitations. Les résultats montrent que certains types d'exploitations sont plus affectées par ce changement que d'autres, c'est notamment le cas des agriculteurs qui, contrairement aux éleveurs, n'ont pas facilement accès au fumier. D'autre part, sans l'accès aux intrants, les productions totales sur la zone étudiée diminuent de 30% (fig. 22). Cette différence équivaut au volume de calories permettant de nourrir 2300 personnes. Cet exemple illustre l'importance de la stratégie d'accès aux intrants développée par l'entreprise cotonnière dans les productions de la zone.

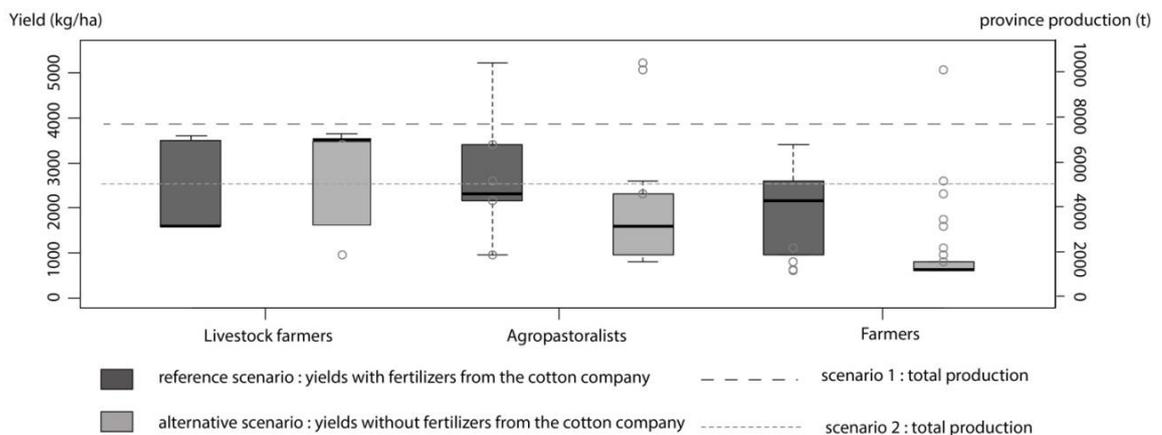


Figure 22: Comparaison des rendements pour chacun des types d'agriculteurs et de la production à l'échelle de la province en fonction des deux scénarios.

2.3. Discussion

Six points ont été discutés à l'issue de ces résultats :

- La généricité du modèle.
Le modèle développé est semi générique, susceptible d'être appliqué à d'autres régions après quelques modifications apportées pour prendre en compte les spécificités propres à chaque zone. Il est possible d'en modifier facilement les données d'entrée, les processus et d'ajouter des niveaux d'analyse.
- Les possibilités de modélisation à différentes échelles spatiales et temporelles
Le croisement d'échelles spatiales est réalisé de deux manières : en liant au sein de chaque processus des éléments issus de différents niveaux d'organisation et en liant entre eux des processus ayant lieu à des niveaux différents. Ces deux types de croisements sont bidirectionnels, mêlant les approches descendantes et ascendantes.

La multiscalarité du modèle inclut aussi les échelles temporelles, imbriquant deux pas de temps différents et faisant interagir des processus s'exprimant dans ces deux temporalités.

- L'alternative aux méthodes d'agrégation/ désagrégation.
Le recours à l'agrégation ou à la désagrégation, qui entraîne souvent des déformations de l'information est évité de trois manières. Tout d'abord, les données sont utilisées à leur propre niveau d'organisation, le croisement d'échelles étant effectué via la relation liant deux données de niveaux différents. Ensuite, le recours à des niveaux d'organisation intermédiaires permet d'appréhender à un certain niveau des processus ayant lieu à un niveau différent tout en tenant compte des effets de processus ayant lieu à un niveau intermédiaire des deux premiers. Enfin, l'utilisation de fonctions de distribution à tous les niveaux d'organisation permet de simuler un panel de situations pour représenter leur diversité. Cela évite d'avoir un même prototype d'exploitation répliqué sur tout le territoire, et permet d'avoir une représentation des cas particuliers.
- Possibilité d'analyse multiscalaire des agroécosystèmes.
La principale contribution de l'approche est d'offrir des possibilités d'évaluation des impacts de scénarios à différentes échelles, avec des indicateurs spatialement explicites. Une telle approche, liant le champ, la parcelle, l'exploitation et la zone climatique n'a à notre connaissance encore jamais été implémentée. La transition d'échelle innovante effectuée dans notre méthode permet aux modèles de lier les deux aspects fondamentaux des agroécosystèmes : la production du sol et l'utilisation/occupation du sol.
- Contribution à l'approche Ocelet
Le modèle développé apporte deux innovations par rapport aux travaux existants effectués avec Ocelet. La première est l'utilisation des graphes d'interaction pour lier les entités spatiales d'un niveau d'organisation à l'autre. La seconde est la spatialisation d'un modèle de culture sur une zone étendue.
- Limites d'utilisation d'un tel modèle d'agroécosystème
La qualité et la résolution des données utilisées dans le modèle sont sources d'approximation qui peuvent affecter les sorties du modèle. Une autre limite identifiée est l'absence dans le modèle de certains éléments, pourtant essentiels à l'appréhension des dynamiques des agroécosystèmes. Pour exemple : l'activité d'élevage, le fonctionnement économique des exploitations ou les flux de matière dans les sols. Enfin, la validation réalisée n'a concerné que les grandes tendances, une calibration plus fine est maintenant requise.

En conclusion de l'article, le cas d'étude du Burkina Faso a présenté une approche alternative pour aborder les problèmes d'échelles rencontrés par les modélisateurs. La méthode présentée propose de nouvelles possibilités d'identification et de quantification des facteurs moteurs des changements des agroécosystèmes, incluant ceux qui ne sont pas spatialement explicites. Les perspectives d'un tel travail sont dorénavant d'établir le lien avec les données de télédétection, qui pourraient contribuer à réajuster les paramètres du modèle afin de contraindre les processus modélisés

3. Article 1 : *Spatial modelling of agro-ecosystem dynamics across scales: A case in the cotton region of West-Burkina Faso*

Camille Jahel^a, Christian Baron^a, Eric Vall^b, Medina Karambiri^c, Mathieu Castets^a,
Kalifa Coulibaly^c, Agnès Bégué^a, Danny Lo Seen^a

^a UMR TETIS, CIRAD

^b UMR SELMET, CIRAD

^c UR PAN, CIRDES

Cet article a été publié dans *Agricultural Systems* en Mai 2016 (fig.9).

ARTICLE IN PRESS

AGSY-02135; No of Pages 13

Agricultural Systems xxx (2016) xxx-xxx



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Agricultural Systems

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agsy



Spatial modelling of agro-ecosystem dynamics across scales: A case in the cotton region of West-Burkina Faso

Camille Jahel^{a,*}, Christian Baron^a, Eric Vall^b, Medina Karambiri^c, Mathieu Castets^a, Kalifa Coulibaly^c,
Agnès Bégué^a, Danny Lo Seen^a

^a UMR TETIS, CIRAD, TA C-91 / MTD, 500 Rue J.F. Breton, 34093 Montpellier Cedex 5, France
^b UMR SELMET, CIRAD, TA C-112 / A-Avenue Agropolis, 34398 Montpellier Cedex 5, France
^c UR PAN, CIRDES, Burkina Faso

ARTICLE INFO

Article history:
Received 1 February 2016
Received in revised form 14 May 2016
Accepted 26 May 2016
Available online xxx

Keywords:
Agro-ecosystem modelling
Cross-scaling
Interaction graphs
Burkina Faso
Farm typology
Landscape dynamics

ABSTRACT

Models are increasingly being used to investigate agro-ecosystems dynamics, although processes interacting at different scales remain difficult to consider. When upscaled or downscaled based on aggregation or disaggregation methods, information is generally distorted. This study explores agro-ecosystem modelling using an interaction graph-based modelling approach that explicitly link elements at different scales without up or downscaling. The study area/time frame is the cotton region of West Burkina Faso over the last fifteen years. Field, plot, farm and climate entities are linked in graphs that evolve according to functions computed along different time steps. Three main processes and their interrelations are simulated, occurring at different spatial and temporal scales: crop area expansion, crop rotation and crop production. Three simulation examples are presented to illustrate the analytical possibilities allowed by the approach. These examples test i) the geographical distribution of plots as a means to face climatic risks, ii) the effect of fallowing practice in a spatially constrained cotton dominated landscape and iii) the consequences of reduced access to credit for farmers to buy fertilizers. Model outputs enable quantifying and mapping the respective effects of processes at different scales. Results show that modelling across scales is achievable without resorting to methods of aggregation or disaggregation, which opens new perspectives in multi-scalar analyses of agro-ecosystems that link land production and land use and land cover.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Figure 23: Entête de l'article publié en Mai 2016

Abstract

Models are increasingly being used to investigate agro-eco-systems dynamics, although processes interacting at different scales remain difficult to consider. When upscaled or downscaled based on aggregation or disaggregation methods, information is generally distorted. This study explores agro-ecosystem modelling using an interaction graph-based modelling approach that explicitly link elements at different scales without up or downscaling. The study area / time frame is the cotton region of West Burkina Faso over the last fifteen years. Field, plot, farm and climate entities are linked in graphs that evolve according to functions computed along different time steps. Three main processes and their interrelations are simulated, occurring at different spatial and temporal scales: crop area expansion, crop rotation and crop production. Three simulation examples are presented to illustrate the analytical possibilities allowed by the approach. These examples test i) the geographical distribution of plots as a means to face climatic risks, ii) the effect of fallowing practice in a spatially constrained cotton dominated landscape and iii) the consequences of reduced access to credit for farmers to buy fertilizers. Model outputs enable quantifying and mapping the respective effects of processes at different scales. Results show that modelling across scales is achievable without resorting to methods of aggregation or disaggregation, which opens new perspectives in multi-scalar analyses of agro-ecosystems that link land production and land use and land cover.

Keywords

agro-ecosystem modelling; cross-scaling; interaction graphs; Burkina Faso; farm typology; landscape dynamics.

3.1. Introduction

Recent studies have stressed on the importance of identifying driving factors of agro-ecosystems dynamics in order to support decision-making (National Research Council, 2013). By postulating that landscape dynamics result from interrelations between natural resources, farming practices and landscape patterns, the landscape agronomy approach provides an appropriate framework for studies focusing on agro-ecosystem dynamics (Benoit, Rizzo et al., 2012). However, understanding farming activities within their agricultural landscape setting implies that processes at multiple scales must be considered. Gibson and Ostrom (1999) refer to scales as “the spatial, temporal, quantitative or analytical dimensions used for measuring or studying phenomena”, whereas the term “level” refers to organisational aspects with no clear extent and resolution. Each process takes place at a specific level in the agro-ecosystem (Dovers, 1995; Meentemeyer, 1989; Veldkamp et al., 2001; Verburg et al., 2004) and can include elements at other levels. The processes and actors involved at different levels are linked through interactions or retroactions (O’Neill et al., 1989) that define the cross-scale organisation of the system (Peterson and Parker, 1998). For example, cropping practices induce processes that occur at plot level, but result from farmer strategies deployed at farm level. The strategies themselves take into account a variety of factors that pertain to the regional level, such as public policy, the evolution of food prices or recommendations from

farmer organization. Thus, a multi-scalar approach is often necessary for understanding and monitoring agro-ecosystem dynamics.

Modelling is increasingly being employed for investigating such dynamics at regional level (e.g. Agarwal et al., 2002; National Research Council, 2013; Veldkamp et al., 2001) and also faces important scale issues that have to be addressed (Houet, 2010). These are primarily due to the complexity of inter-scalar relations, like for instance when observations made at a given level are due to interactions at different levels (Overmars and Verburg, 2006). These relations are often non-linear and may be valid at a given level but not at another. They are thus difficult to describe in a model. Moreover, modellers can be led to adopt a specific scale of analysis that often depend on the research question, or under the constraint of the extent and spatial resolution of the data used.

Aggregation and disaggregation between levels which are the current methods used when working at different scales generally cause information distortion. Indeed, relations taking place at a fine level cannot be transposed to another level, and vice versa (King et al., 1989; Overmars and Verburg, 2006; Rastetter et al., 1992; Verburg et al., 2004). Aggregation methods often simplify information (Leenhardt, 2010), most of the time averaging the outputs in order to upscale them, and information aggregated into a coarser level often does not fairly reproduce phenomena occurring at this level. These raise the question of how to model processes in agro-ecosystems across spatial and temporal scales without distorting information through upscaling or downscaling.

Several approaches are available for modelling a system in space and time (e.g. cellular automata, systems dynamics, agent-based or graph-based systems) (Degenne et al., 2010; Fall et al., 2007; Ferber, 1995; Forrester, 1968; Gasser et al., 1987; Hewitt, 1976; Von Neumann, 1966). Among them, the Ocelet approach (Degenne and Lo Seen, 2016), that had been developed for modelling spatial dynamics, uses interaction graphs to describe a system (like here, an agricultural landscape) in terms of entities distributed in space that are in interaction with each other. The capabilities of graphs to link entities that are defined at different scales, make an interaction graph-based approach a good candidate for studying scale issues.

The objective of the present study is to explore the possibility of modelling agro-ecosystem dynamics with processes that explicitly reach across scales, and to use such modelling for investigating problems that link the agricultural landscape, the farm and the plot levels.

The study area chosen for the present study is the cotton region of West Burkina Faso. During the last fifteen years, agro-systems in this area have been undergoing rapid and profound changes, due mainly to intense demographic pressure and development policies in favour of export crops (Gafsi et al., 2007). These changes were clearly observable at landscape level, with the wide adoption of cotton as export crop resulted in a drastic shift from a former system based mainly on cereals, to the present maize-cotton crop rotation system (Bainville and Dufumier, 2009; Vall et al., 2006). Those new crops systems gradually extended at the expense of savannahs (Augusseau, 2007; Caillaud et al., 2012; Leroux, 2014; Serpantié, 2003; Tallet, 2007). The increasing pressure on agricultural lands, mainly due to population natural growth, migrations and increase in cropped areas, forced farmers to gradually reduce fallows and to develop more intensive production systems (Caillaud, 2011; Gafsi et al., 2007; Guyer et al., 1993; Serpantié, 2003). Today, these systems are subject to soil-depletion, and land pressure has given rise to conflicts over access to resources (Vall et al., 2006). These conflicts occur mainly between farmers and livestock farmers during the crop season. The livestock

farmers having their systems based on herding often have to adapt their herd management to the new saturated landscape. This situation is further worsened by the strong inter and intra-annual climate variability to which farmers are exposed due to a severe lack of basic facilities (Gafsi et al., 2007).

The main agro-ecosystem processes in the cotton region of West Burkina Faso were thus modelled using the Ocelet approach to simulate crop production and land use and land cover changes over the last fifteen years. After a description of the known processes in the study area and how they have been modelled, the paper focuses on the use of the model to test the effects of: a) the distribution of plots within the landscape in a strategy to limit climatic risks, b) fallowing in landscapes short of available space, and c) the use of fertilizers on food crops by farmers contracted to cotton companies. These issues have been chosen both to illustrate the potential use of such models when analysing an agro-ecosystem at different scales, and to give examples of what types of processes, entities and interactions need to be taken into account. We then discuss the results obtained in terms of opportunities and limits of the use of agro-ecosystem models to address scale issues, before concluding on the methodological and thematic contributions of the study.

3.2. Material and method

The time frame for modelling agro-ecosystem dynamics of the study area is between 2000 and 2015. Three processes linking elements at different scales and/or organisation level are considered as the main factors of change: i) the expansion of the cropland, ii) the crop rotation, and iii) the crop production. The study area, the data used, the model and the scenario are described in this section.

3.2.1. Study area

The study area of approximately 6000 km² is the Tuy Province, located in the cotton region of West-Burkina Faso. The landscape is a plateau of about 300 m above sea level, with a few isolated hills of 570 m maximum height, separated by plains. The most common soil type is ferruginous tropical (Leprun and Moreau, 1969). The climate type is Sudanian with a rainfall of 800 to 1100 mm per year (Aubrèville, 1949). Inter-annual rainfall variability is high, which strongly affects yields in a predominantly rainfed agriculture. The rainfall spatial variability is also important, with an average annual difference of 240 mm between the extreme values. The maximal difference (437 mm) was recorded in 2012 between Koumbia and Bereba. (Fig.24b).

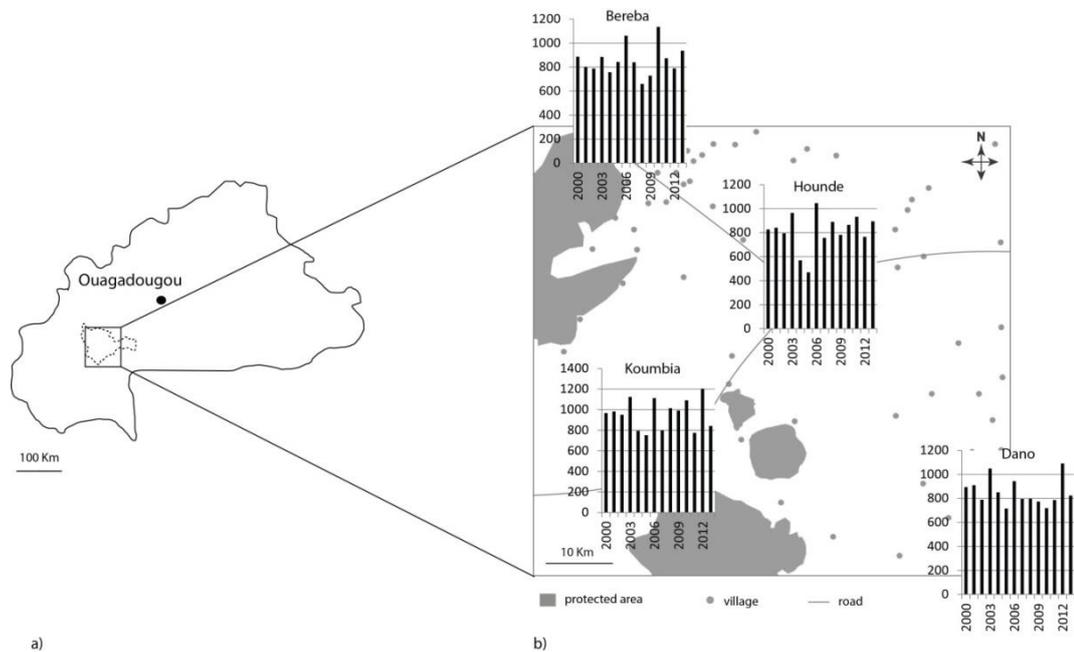


Figure 24: a) Location map of the study area in Burkina Faso (the boundary of the Tuy province is in dotted lines); b) spatial and inter-annual (2000-2013) variability of the rainfall measured over four villages in the study area. Climate data are from the Meteo

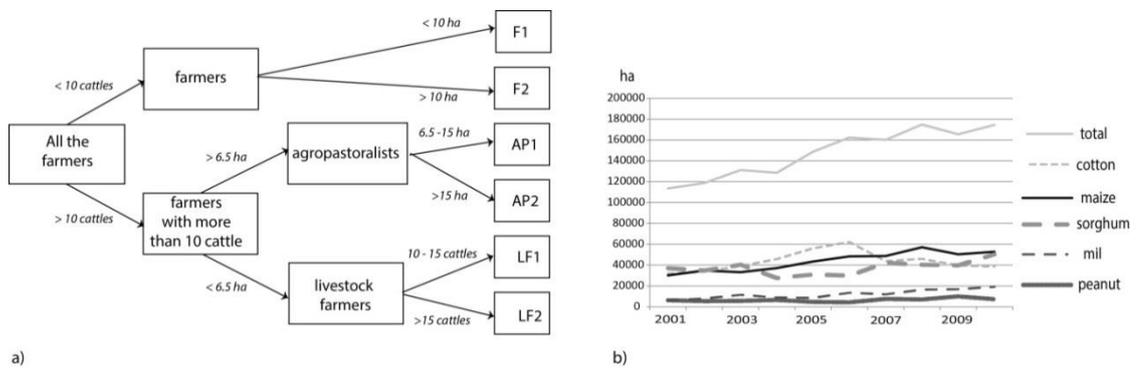


Figure 25: a) Farmers typology (Marre-Cast and Vall, 2013) ; b) Evolution of the main crops harvested areas (sources : AGHRYMET, and SOFITEX for the cotton). These data contain harvested areas, but not all the areas sowed (the difference being mainly due to climat).

The land cover is composed of cultivated plots and some degraded savannahs, with about 20 % of the area in reserve forests. The main crops are maize, cotton, sorghum and millet. Marre-Cast and Vall (2013) gave a typology of the farms in the region, with farmers (around 10 ha, some draft animals), agro-pastoralists (6.5-30 ha and a cattle herd), and livestock farmers (less than 6.5 ha, a herd of 10-50 heads) (Fig. 25a). Farmers make up 80 % of the farms in the region, agro-pastoralists 15%, and livestock farmers, 5%.

Since 2000, the region has undergone important transformations due to multiple factors. One of them is demography, with a growth rate of 42 % between the 1996 and 2006 censuses. This higher than expected growth rate is the result of migration mainly from the north of Burkina Faso, or the return of migrants from neighbouring countries (e.g. Ivory Coast), amplifying the natural growth of an already large population. The number of farms thus increased from about

22,000 in 1996 to 27,000 in 2006 (RGPH 1996 and RGA 2007). In parallel, studies have shown an increasing trend in farm size (Marre-Cast and Vall, 2013), with the spread of animal traction and chemical herbicides, and the introduction of the first tractors.

All these innovations have accompanied the development of cotton, which has become increasingly important (Fig. 2b). The cotton sector is indeed extremely well organized around a semi-private company that sells seedlings and inputs on credit to farmers at prices determined before the beginning of the seasons. Farmers are organized in groups to deal with the company. Each village has several Cotton Producers Groups (GPC) all of them belonging to the National Cotton Producers Union Burkina (UNPCB). But although well organized, the cotton sector could not avoid a decrease in the cultivated area in 2006 due to various factors (e.g. decreasing cotton prices, raising inputs prices, decreasing soil fertility) (Fig.25b) (Augusseau, 2007; Bainville and Dufumier, 2009; Caillault et al., 2012; Diallo and Vall, 2010; Serpentié, 2003; Vall et al., 2006).

3.2.2. Material

The initial landscape, in 2000, was obtained by combining a simplified land cover map and a vectorial plot structure (Fig.26). The simplified land cover map was obtained from the analysis of two Landsat7 archive images acquired in April and November 2000 (Fig. 3a) at 30 m spatial resolution. The spatial resolution of Landsat image being too broad for plot limits extraction, we acquired a Spot5 image of January 2014 at 2.5 m resolution. Based on the assumption that the plot structure remains globally stable in time, the initial plot structure was obtained by segmenting the SPOT5 image (Zermeno, 2015).

The forest clearance map between 2000 and 2007 was obtained by classifying Landsat image acquired in February and October 2007 according to the same classes than the simplified land cover map produced for the year 2000 (Zermeno, 2015).

Other data used in the model, such as the villages' population, the roads map, the crop prices, the soil types, the daily rainfall and other meteorological data, are listed in Table 3. The support units of these data are the spatial units for which the data have been collected (e.g. as described by Bierkens et al., 1997, and reported in Faivre et al., 2004).

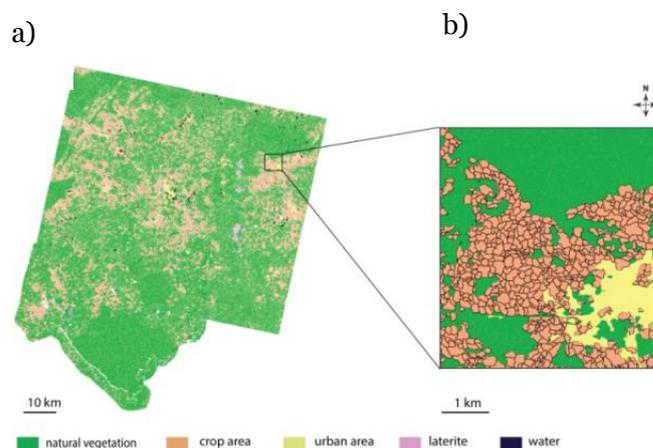


Figure 26: a) Simplified land cover map obtained from Landsat images over the study area(2000), and **b) zoom showing the combination of the simplified land cover map and the plot structure** derived from SPOT5 image showing the plot structure (2014) (Zermeno, 2015).

Table 3 Description of the data used as input of the model.

Data type	Organisation level	Support units	Temporal resolution	Source
Population	Village	village	Decade	RGPH 1996, RGPH 2006
Price	National	Province	Month	FAO stat
Soil	Plot	1 km ²		BDOT, 2007
Roads	Province			BDOT, 2007
Rainfall	Climatic zone	30*30 km ² (18 rain gauges for 2014 and 2015)	Day	Meteorology Regional Direction of Burkina Faso
Other meteorological data	Climatic zone	Province (around 5000 km ²)	Day	Experimental meteorological station of Farako Ba (INERA-CIRAD)
Farm type, strategies and cropping practices	Farm	Farm	Period between the year of installation and 2013	Typology described in Marre-Cast and Vall (2013)

3.3. Model

The model's aim is to describe the spatial variability and the time dynamics of the Tuy agroecosystems for the last fifteen years, linking production dynamics to the land use and land cover change.

3.3.1. Definition of the model

The model is defined by the description of all the processes required to represent the agroecosystems studied. The model is developed using the Ocelet language and simulation environment for modelling spatial dynamics (Degenne and Lo Seen, 2016).

In this approach, the processes considered relevant for a given problem are described using interaction graphs. A *graph* is a mathematical concept represented by a set of objects (*nodes*), some of which are linked (through *arcs*). Interaction graphs are graphs with (interaction) functions defined on the arcs that can be executed during time steps to make the system change. Each process involves entities (some of which are spatial and distributed in space) that are in interaction with each other. Tools are provided to easily build graphs from several data sources, and Ocelet being a programming language, also offers substantial expressive power to the modeller during model building. An interesting feature of this language is to facilitate the handling of spatial information. Ocelet proposes the use of "datafacers" which are data interfaces to the main types of data formats, especially spatial data, like ESRI Shapefiles or PostGIS databases, from which spatial entities together with selected attribute data can be easily imported and incorporated in graphs.

The two main phases in model building concern i) the processes and ii) the scenarios.

- i) A process is a series of actions that gradually changes the state of the system over time. For the modeller, it is a higher level concept that contributes to the understanding of how the system behaves (e.g. deforestation is a process during which people cut down a significant number of trees in a given area for a given period of time). A process is modelled by describing all the entities involved in that process, and the relations between these entities. The entities of a given type (e.g. farms) are not identical. They have property values defined individually from data or set randomly from probability density functions around mean values. Another process is then defined, by adding other entities if required (entities are often involved in several processes), other relations brought about with the new process. At this stage, the processes are only defined but are not executed.
- ii) A scenario describes when and in what sequence different actions of the modelled processes take place. During a simulation, interaction functions are executed during time steps over a period of time. Different time steps can be defined within the same scenario. Several scenarios are generally built for a model, including at least one reference ('from past to now') scenario and several alternative ('from now on') scenarios to compare possible futures.

3.3.2. Entities

The present model requires four types of entities, defined at different organization levels: the Plot, the Field, the Farm and the Climate.

The Plot entity groups several contiguous fields belonging to the same farmer. In general, the plots belonging to the same farm are not always grouped, and can be up to a few kilometres apart. Around the village centroid based on population density and farmers typology, the plots with their Fields entities are linked to the Farm entities to which they belong. A farm can have several plots, and each plot can be made of several fields. Each Field entity is also linked to a Climate entity of the same area (Fig. 27). Climate entities were defined as areas with the same meteorological (temperature, relative humidity, global radiation) and rainfall conditions. Each entity type is defined with a number of properties whose values can change with time. Some values are assigned at the beginning, with the input data. Some others are calculated by the model (for instance the crop phenological variables, the biomass and the yield). The properties include georeferencing, with position for the Climate entities (located on the rain gauges) and shape for the Plot and Field entities. Table 4 gives a list of the main properties included in each entity type.

Table 4. Entities of the model and their main properties and topology.

Entity	Main properties	Topology
Climate	Rainfall, temperature, Potential EvapoTranspiration , air humidity, global radiation	Buffer
Farm	Type, area, village, crop portfolio, family size	Ensemble of plots
Plot	Area, land cover, accessibility, land status, slope	Polygon
Field	Area, latitude , altitude, soil texture, crop, previous crops, cultural practice, sowing date, soil moisture variables, phenological variables, biomass, yield	Polygon



Figure 27: Model structure: relations between entities.

3.3.3. Processes

Process 1: Crop area expansion

At province level, the evolution of crop area is modelled at a year time step, and results from three sub-processes: i) the farm size evolution, ii) the farm division or disappearance, and iii) the creation of new farms. These are modelled as interaction functions on the arcs of the Plot-Farm relation graph.

- i) A percentage of the farms present (a parameter of the model) is allowed to change in size. The change in surface area of the farms can be positive or negative, depending on farm size and type (e.g. farmers, agro-pastoralists, livestock farmers). The proportion of change for each farm surface is randomly chosen within the interval established for its type, as described by Marre-Cast and Vall

(2013). An increase in size is obtained by adding non-crop plots to the farm until the chosen proportion is reached. The new plots are chosen within the list of non-cropped plots according to their location and other properties like slope, soil type and whether they belong to the protected area. For a decrease in size, plots are removed from the farm and converted in fallow.

- ii) A farm life cycle also includes division or disappearance. A small percentage of the farms are randomly selected either to be divided or to disappear. When a farm is divided, the plots of the original farm are shared between two or three children. New farms are thereby created and their types are chosen according to their total area and the type of the mother farm. When a farm disappears, their plots become fallow.
- iii) In each village, a number of farms are created, depending on migrants' arrival and the natural population growth (both inputs of the model). The new farms are given non-crop plots chosen in function of their location and other plot properties.

Process 2: Crop rotation

At farm level, crop rotation is carried out yearly, in several steps. At the end of the year, each field belonging to the farm has a crop allocated or is left as fallow (e.g. Houet et al., 2014; Maxime et al., 1995; Schaller et al., 2011). These steps are modelled in interaction functions on the arcs of the Field-Farm relation graph.

- i) Information update at farm level for crop rotation decision: expected crop prices, previous year price, cost of fertilizers, farm type, membership in a farmer group, surface area, crop yields of previous year;
- ii) Choice of crop portfolio. The strategy is the same for each farm, with variations depending on farm type. First, the farmer defines the surface area cultivated with maize according to the size of the family (maize production is partly used for home consumption, and the number of persons on a farm is a variable property of the Farm entity). Then, cotton area is chosen as a function of maize area and cotton market price. This is due to the fact that in the province, the cotton sector provides farmers with fertilizers that are in practice used for both cotton and maize (this last point will be presented in more details in part 3.2). The remaining area available is divided between secondary crops, with varying proportions according to farm type;
- iii) Crop allocation to different fields taking into account: previous crops, soil type, maximum duration of a crop, the return period of a crop on a field, time under fallow;
- iv) Choice of cultural practices for each crop and priority set for sowing and harvesting.

Process 3: Crop production

At field level, the crop model Sarra-H (Baron et al., 2003) is run with a set of field specific parameters, cultural practices, and rainfall and meteorological input data, to simulate crop dynamics and yield at harvest time for maize and sorghum. The model Sarra-H has been rewritten in Ocelet in terms of Field-Farm and Field-Climate relations to take into account, respectively, cultural practices, and daily climatical data for each field. The sowing date is determined by cultural practices, crop variety, cycle duration, soil moisture, and the sowing dates of the other fields in the plot. At each daily time step, water and carbon budgets are written taking into account phenological phases to simulate the evolution of biomass, leaf area index, soil water content, and other crop variables. At the end of the season, yield is obtained from grain biomass. At this stage, only maize and sorghum development are simulated. Work is ongoing to include other crops.

In each process, the diversity of situations is represented by the use of probability density functions. Most of the parameters are intervals and property values for each entity can be randomly chosen within the intervals.

3.3.4. Scenarios

The scenario consists in an initialisation phase followed by a simulation phase that includes time loops of different time steps (Fig. 5).

The initialization phase is a first step where initial graphs are built, according to the agro-ecosystem status in year 2000. During this phase (Fig. 5), Ocelet uses a data interface (*datafacier*) to import Field and Plot entities directly from the year 2000 cropland map built from remote sensing data (Fig.3), together with attribute data (area, soil type, land cover type) that are read directly into the corresponding entity properties. Farm entities are then created from field and plot entities. The number of farms of each type (farmers, agro-pastoralists, livestock farmers) and their respective areas reflect the available knowledge of the region. The proportions of farms types are those given in Marre-Cast and Vall (2013). For each farm, a surface area is chosen randomly within the range of surface area that corresponds to the farm type. The Plot-Farm graph relation is built by connecting plots to corresponding farms with the constraint that the maximum distance between plots of the same farm depend on farm type. In that way, the initial situation reproduces the year 2000 landscape, with forest boundaries, and with plots belonging to different farm types.

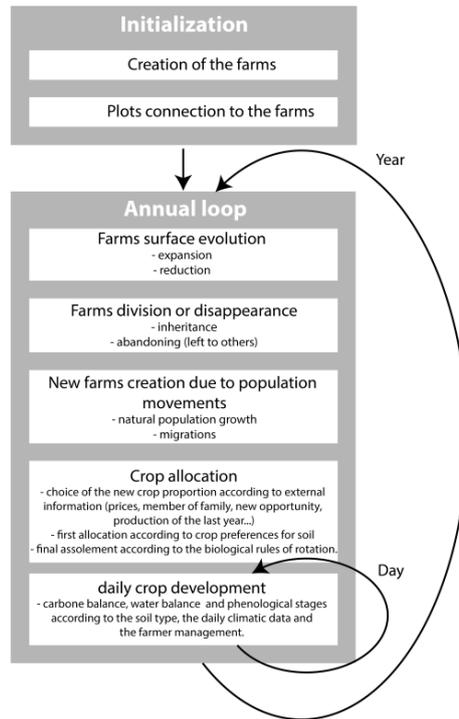


Figure 28: Scenario structure.

The simulation phase consists of an annual loop that activates the three processes of crop area expansion, crop rotation and crop production (Fig. 28 and Fig.29). The latter process also includes a daily loop to simulate daily crop development. This vertical scenario structure hides horizontal, spatially explicit landscape elements that are connected through interaction functions that can be activated at different time steps to make the landscape change with time.

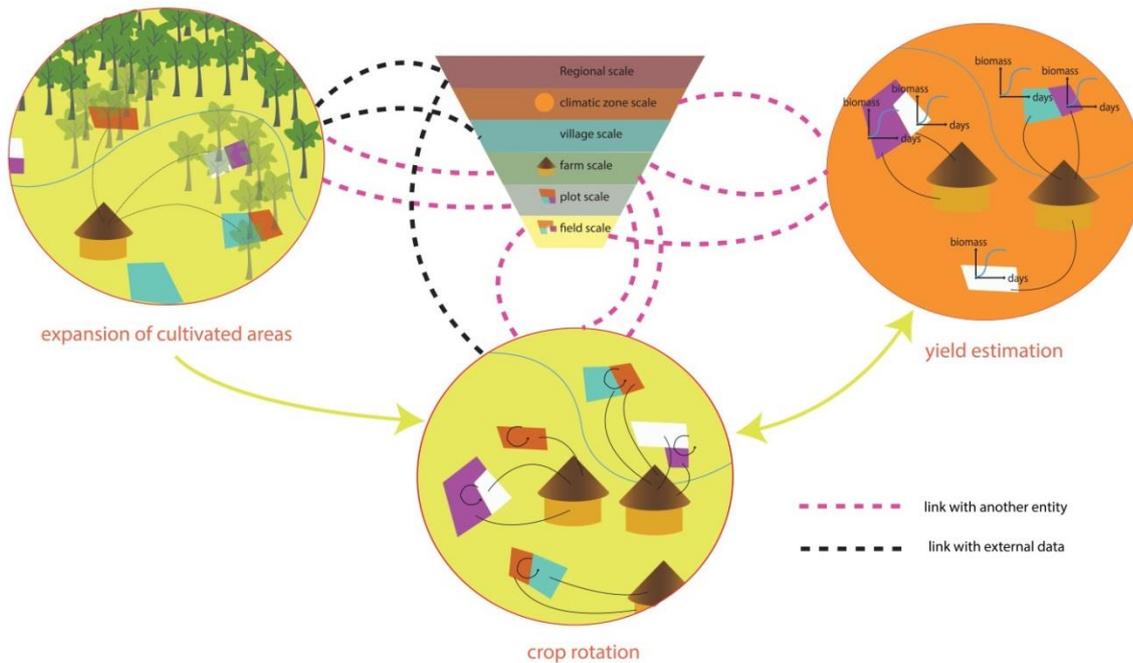


Figure 29: The three main processes modelled with explicit reference to different levels.

As described in the framework for scenario exercise by Leenhardt et al. (2012), we define the reference situation and different alternative scenarios. The reference situation was simulated as the fairest reproduction of the observed landscape changes between 2000 and 2015. This scenario was calibrated to obtain outputs as close as possible to the observed landscape. Then, alternatives scenarios can be built by modifying the processes, input data or parameters values (Fig.30). The effects of these modifications can then be quantified and localized by analyzing the different spatial outputs.

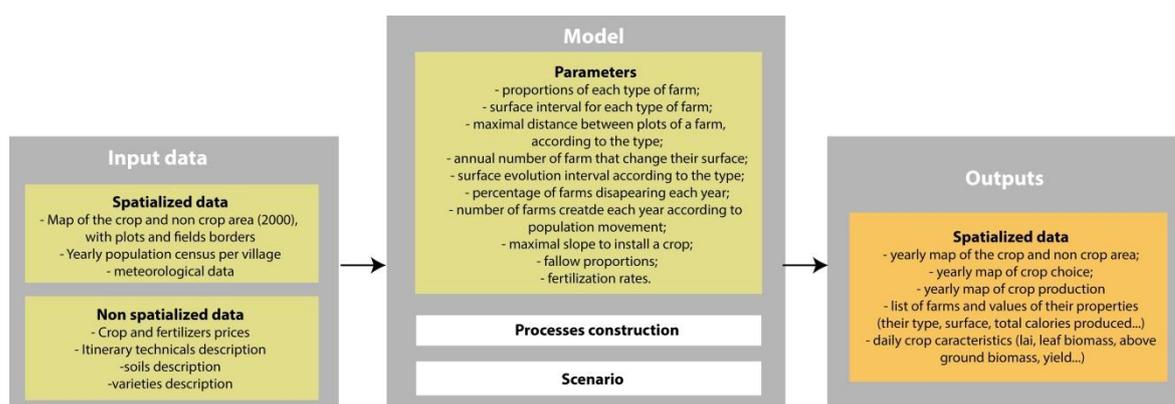


Figure 30: Overview of the model, the inputs involved and the outputs generated. The input and parameters possibly changed to create alternatives scenarios are in green.

3.4. Results

This section gives an overview of the different types of model outputs, and illustrates the potential use of the model in multi-scalar analyses through a quantitative comparison of potential scenarios. The latter were chosen to document complex situations that involve, for example, a farmer adaptation strategy to climate variability, the continuous shortage of agricultural lands, or the concealed links between cash and food crops.

3.4.1. Model validation on reference scenario and overview of outputs

The validation of a model must be compatible with the objectives and proposed use of the model. In the present study, where the focus is on investigating problems involving processes that link different scales, model validation consisted in comparing simulated cultivated area expansion and observed forest clearance to ensure that the model is able to represent the variability observed in the Tuy province. Forest clearance maps were derived of Landsat images of 2000 and 2007 (Zermeno, 2015) and compared with model simulations on a grid of 100 ha squares. Each square contains the number of hectares cleared between 2000 and 2007. We obtained a mean residue per squares (the difference between both clearance maps in hectares per 100 ha square) of 6.6 ha, with a standard deviation of 21.6 ha.

Another validation concerned crops rotations. The mean proportions of harvested crops obtained for three of the years simulated (2003, 2004 and 2005) were of 76% for subsistence crops (cereals, peanuts, beans and rice) and 24% for cash crops (cotton and sesame). The proportions observed by AGRHYMET for these three years were quite close with 60% of subsistence crops and 40% of cash crops.

Finally, the yields simulated were found to be close to the yield variability observed in the province in 2014 (farm survey over 150 fields): the maize yield was between 836 and 6325 kg.ha⁻¹ whereas the yields obtained with the model were from 620 to 5210 kg.ha⁻¹.

As the model simulates the status and changes of a large number of entities at each time step, it is possible to generate spatial indicators at required organisation levels and time steps.

At province level, Fig. 31a gives an overview of the simulated cropped area change between 2000 and 2007 as expressed by the intensity of clearance (fallow or natural vegetation surface area converted to crop within 1 km² cells). Zones less impacted by clearings are i) protected areas, ii) areas already saturated by crops and iii) areas with poorer lands.

At farm level, Fig. 31b presents crop area for three consecutive years. Between successive years, crops change and new plots appear. The model takes into account the annual change of cropped areas when simulating crop rotations. In that simulation, farmers had to choose between 6 species, and also had the possibility to fallow. The model explicitly includes crop allocation and rotation rules that can be expressed in dynamic maps. In this example, maize-cotton rotations are predominant, while secondary crops are non-negligible.

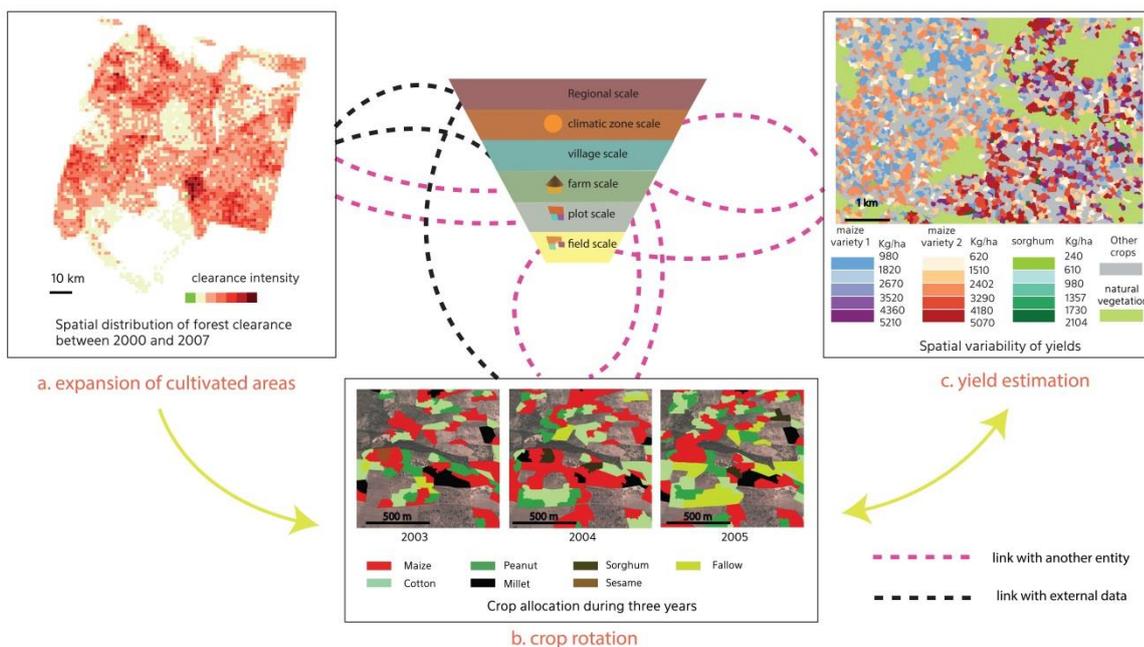


Figure 31: Examples of model outputs at a) the province, b) farm, and c) field levels.

At field level, Fig. 31c presents a simulated-yield map over one year. Important yield variability can be observed for each variety of maize. For the long cycle maize variety, for example, yield lies between 980 kg.ha⁻¹ and 5210 kg.ha⁻¹ depending on soil type, rainfall, fertilization level and sowing date.

3.4.2. Examples of quantitative comparison of alternate scenarios

We illustrate the variety of issues that can be investigated with the model developed using three examples involving different organisation levels. Several experiments with different

scenarios were thus simulated over one year for an area of 180 km² in the Tuy province to analyze a) the geographical distribution of plots as a means to face climatic risks, b) the effect of fallowing practice in a space constrained cotton landscape, and c) the consequences of reduced access to credit for farmers to buy fertilizers. Table 5 presents the processes and the organisation levels involved in each experiment.

Table 5: Processes and organization levels involved in the three simulation experiments.

Experiment	Process				Level		
	Crop expansion	Crop rotation	Crop production	Climatic zone	Farm	Plot	Field
Geographical distribution of plots			x	x	x	x	x
Fallowing practices		x				x	x
Reduced credit for buying fertilizers		x	x	x			x

a. Testing a geographical distribution of plots to face climatic risks

Most of the farms have many different plots, each of them regrouping several fields. Recent investigations (Vall, 2013) have shown that these plots are generally distant from each other. The distance between them can be up to 20 km in extreme cases, but distances of more than 5 km are quite frequent. A same crop is generally distributed between many plots. This technique of plots and crops dispersion in space has already been observed in other regions of the Sahel (Milleville, 1989). The farmers distribute their crops in different types of soils and climate areas as a means to reduce risks (like putting eggs in different baskets). Climatic risks are mainly due to the rain spatial variability, with many localized rainfall events.

In order to quantitatively assess the effects of this strategy, a scenario has been simulated. We separated the area in two subzones with a rainfall difference of 400 mm (corresponding to one of the most extreme event ever observed on the province these last fifteen years). We parameterized the maximum distance between the farm plots in order to have part of the farms with their plots spread in both subzones (470 farms), and the other part having their plots grouped in either subzones (305 farms).

In that way, the two scenarios tested have different plot distribution in space:

- The first scenario reproduces a farmer strategy where plot and crops are grouped.
- The second scenario reproduces the farmer strategy where plots and crops are spatially dispersed.

For these two scenarios, two different varieties of maize have been taken into account. Four levels of fertilization are simulated, depending on the farm type. To simulate the farmer adaptation to the beginning of the rainy season, the sowing dates depend on the start of rains. Two different soil types have also been taken into account, with both present in the two subzones in the same proportions.

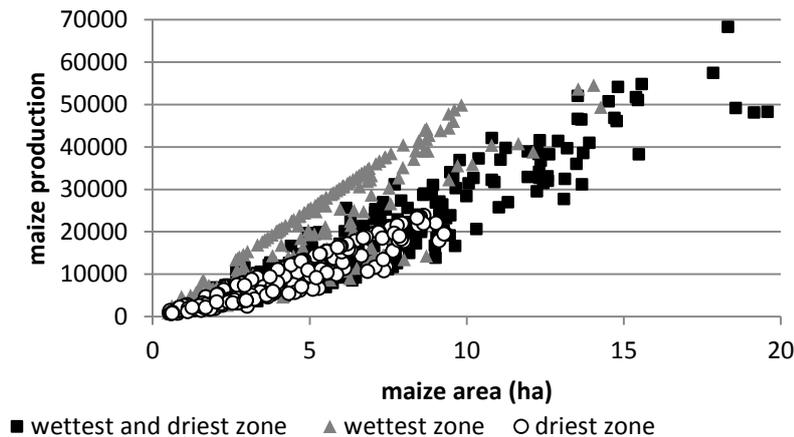


Figure 32: Maize production and area per farm according to the two farmer strategies of the geographic distribution of the plots (black symbols for the “crop dispersion scenario”, and grey and white symbols for the “grouping scenario”).

The model reproduced a large range of situations. The high variability of maize production in each zone is due to the diversity of possible combinations between factors influencing crop production (soil, variety, fertilizers, etc) (Fig.32).

The farms with plots grouped in the driest zone have their whole production affected by the climatic conditions (the yield going from 820 to 2700 kg.ha⁻¹, with a median yield of 1850 kg.ha⁻¹). On the contrary, farms with grouped plots in the wettest zone take advantage of the good rainfall (the yield going from almost 1000 to 5200 kg.ha⁻¹ with a median yield of 3400 kg.ha⁻¹). Farms with plots spread over both zones are producing fewer values of extreme yields, and are grouped around the mean of 2374 kg.ha⁻¹. It illustrates the importance of plot spatial distribution, which diminishes the potential production but reduces risks of failed production in case of unfavourable rainfall.

b. Testing the effect of fallowing practice in a space constrained landscape

At the beginning of the 80's, cropping systems were based on cereals rotations with fallows which preserved soil fertility. Generally, a field was cultivated during three years and was then put in fallow for 10 to 15 years before being cultivated again (Milleville and Serpentié, 1994, Serpentié et al., 2007). The introduction and generalization of chemical fertilizers with cotton in the 90's, allowed shortening fallow periods by compensating for the fertility loss. This gradual decrease of the fallow practice has been amplified by the demographic growth and an increased need for land. Currently, the fallow practice has been abandoned by many farmers owning insufficient land, while for others who carry on integrating fallow in their cropping system, the duration lasts no longer than 5 years.

Two scenarios have been tested for year 2014, with a variation of the fallow parameter, and with same farm areas.

- The first scenario reproduces the current production systems, with a fallow practice in part of the farms (10%) which does not exceed 5 years.

- The second scenario reproduces the 80's fallow practice in part of the farms (around 50%) with duration between 10 and 15 years.

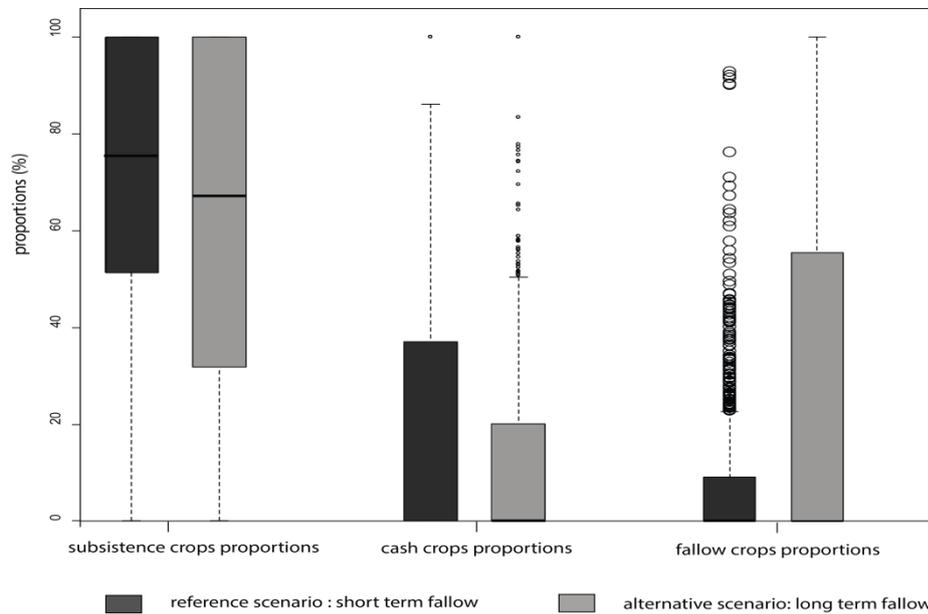


Figure 33: Comparison of the proportions of each crop group for the two scenarios (short term fallow groups in black boxes; long term fallow groups in grey boxes). Subsistence crops include cereal, peanut, bean and rice whereas cash crops are mainly cotton and sesame.

The simulation result shows that for systems with long term fallows, the total cereal area is not significantly impacted, whereas the cotton area decreases (fig.33). This result can be explained by farmer strategies implemented in the model: the priority of the farmers is to fulfil family food needs over the coming year. They always prioritize cereals, whose crop areas depend on the number of persons to be fed in the family (Youl et al., 2008). If areas are still available, and provided there is sufficient labour force, farmers complete their production with cash crops (like cotton or sesame). Therefore, when land availability is reduced due to increase in fallows, cotton areas will first be reduced.

Cotton areas decrease but do not disappear, as the cotton company is in a strategy to maintain farmer loyalty. The company gives them the possibility to buy fertilizers on credit in exchange of their commitment to cultivate cotton. Without this credit, farmers could not easily buy fertilizers for maize. This strategy is taken into account in the model, by linking cotton areas to those of maize.

This result illustrates the fact that despite the strategies developed by the cotton companies, cotton which today represents about 30 percent of cropped areas in the province could not have developed in this saturated area if the extensive fallow practice were maintained.

c. Testing the consequences of reduced credit for buying fertilizers

As seen in the previous example, one of the main reasons explaining the important cotton presence in the region is the possibility for farmers to get fertilizers on credit from the cotton company, a part of it being then used for maize. To assess the importance of this contract on

production, we compared two simulations, by introducing a variation of the fertilization parameter:

- The first scenario reproduced the current situation, where most of the farmers cultivate cotton in exchange of fertilizers on credit. As they put a part of the fertilizer on maize, the fertilization parameter is higher (with variations depending on the type of farmer).
- In the second scenario, the company does not sell fertilizers on credit, and only a few rich farmers can then afford them. The fertilization parameter for the maize is set to low for the majority of the farmers.

For each scenario, the same parameters have been chosen (2 maize varieties, 4 levels of fertilization, 2 soil types, 2 climatic areas, 3 farm types).

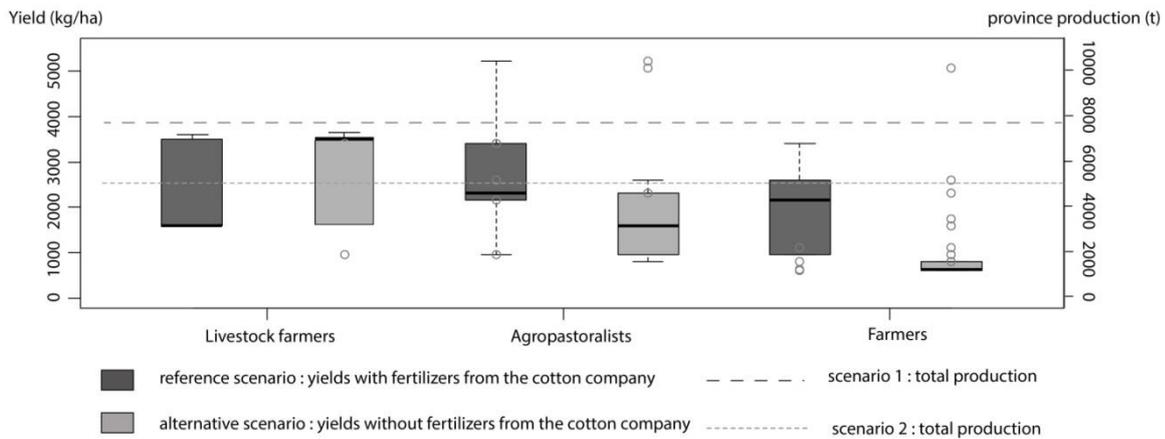


Figure 34: Maize yield and production in the Tuy province given by farmer type, and according to the fertilization rate (dark grey boxes correspond to a high fertilizer rate; light grey boxes correspond to a low fertilizer rate).

The yield difference between both scenarios depends on farm type. The most affected farmers are those who own only 2 or 3 cattle. They often do not have sufficient economic resources to buy fertilizers before the season, and do not have enough cattle to produce manure. They are also the majority of the farmers of the area. The livestock farmers are less affected as they can have more manure from their herd, and some of them are able to buy complementary inputs (Fig.11). The model does not simulate any yield difference for the livestock farmers who only have few plots and a large herd that produce sufficient quantities of manure. Currently, livestock farmers are those who introduce the less cotton in their production system. One of the reasons is that they do not depend on the credit system for fertilizers.

When looking at the overall production of the 180 km² zone, the effects of the strategy of the cotton company to supply fertilizers (on credit) or not are estimated by the model to be a decrease of about 2500 t of maize, that is 30% of the production (Fig.34). This represents the amount of calories needed to feed about 2300 persons. To compensate this loss, an additional 1000 ha of cropped areas with a mean yield of 2500 kg/ha would have been required. This simple test gives an idea of the importance of the access to inputs for farmers in a context of land pressure, and the indirect role of the cotton company in the overall maize production. It

also suggests that the apparent "loyalty" of the majority of the farmers to the cotton company may in fact be due to the state of dependency of these farmers to purchase inputs on credit.

3.5. Discussion

3.5.1. Model genericity

The model developed is semi generic, as its application to other regions is feasible but requires some modifications. Indeed, the main processes modelled are characteristic of any agro-ecosystem (creation and disappearance of farm, farm area evolution, crop rotation and crop production), and involves basic components of agro-ecosystems (e.g. climatic areas, farm, plots). Specificities of each region can be easily reproduced by modifying parameter values (types of farms, distances between plots, fertilization rates). Moreover, input data used are not integrated into the model, and can be changed.

When necessary, processes can be added or modified. For example, the crop choice strategy that takes into account the influence of the Cotton Company on farmer decisions is specific to the region and can be modified.

It is also possible to add other levels of analyses in the model. For example, stakeholders are often socially organized and can strongly influence the agro-ecosystem functioning. They can be modelled as a "group of stakeholders" with concerted strategies. This was not required in the present study, but in other case studies where relations between stakeholders are central, it is possible to include such an entity and level of analysis.

3.5.2. Modelling across spatial and temporal scales

The multidirectional interaction of landscape elements allows linking processes across scales, as each process involves interactions between landscape elements (entities) at different organization levels. For instance, crop modelling which is carried out at field level depends on rainfall and climate data (at climatic subzone level), soil data (at plot level) and information on management strategies (at farm level). Moreover, processes at different levels interact too. For example, the process of crop rotation, carried out at farm level, is linked to the process of crop area expansion (at a regional scale), as it takes into account the new plots added to farms. Similarly, the estimation of crop yields (at field level) depends on crop rotations which are decided previously at farm level. This scale interaction is bidirectional, since the model uses at the same time top-down and bottom-up connections. The top-down approach allows a process to be carried out according to elements defined at a coarser level, while the bottom-up approach refer to processes or elements at finer scale that impact a coarser level (Houet et al., 2014). The process of crop allocation is, for example, determined according to elements that are established at global level, like prices (top-down), but also according to individual field level crop production (bottom-up) (Houet et al., 2014). This bi-directionality is also present between processes: yields are simulated according to crop rotation (top-down: farm to field level), and crop rotation is decided each year, taking into account previous year yields (bottom-up: field to farm level).

Multiple scales also include temporal scales. The model here uses two time steps, one annual and the other daily. Processes occurring at different time steps are made to interact. For

instance, crop area expansion (annual) has an impact on crop production (daily). Moreover, temporal and spatial scales are interdependent, as shown in the relation between crop rotation and crop yield, where crop rotation is decided at farm level taking into account previous year crop yields.

3.5.3. Avoiding aggregation/disaggregation

Cross-scaling can therefore be done without the need to aggregate or disaggregate which often lead to “distorted information”. Aggregation is avoided in three different ways, by: i) using data at their own organization level, ii) resorting to intermediate organization levels and iii) using randomness to represent spatial diversity.

- i) All data is maintained at its own organization level. When two entities at different levels interact, the interaction graphs allow establishing a link between them. It is therefore not necessary to bring them to the same level of organization using aggregated or disaggregated information.
- ii) The use of intermediate organization levels also helps avoiding aggregation and disaggregation of information. For instance, the study of cropping systems at regional level, which is essential for the understanding of territorial dynamics (Leenhardt et al., 2010), is often done by aggregating field level crop production to obtain the regional level production. In the present approach, this cropping system study at regional level is done taking into account the dynamics occurring at different levels. Thus, between the field crop production and the production at regional level, the model integrates processes that take place at intermediate levels such as the evolution of the number and the size of farms (sub-zone and farm level), proportion of each farm type (sub-zone level) and yearly crop allocation (farm level).
- iii) The use of randomness at all organization levels is essential in the cross-scaling approach. It allows simulating a panel of situations to represent their diversity. Each type of farm has its own characteristics; the type “agro-pastoralist” has, for instance, an area ranging from 7 to 30 hectares, thus, each farm will be randomly distributed with a different size within that range. Similarly, each farm has a probability to increase its area by a certain percentage within the percentage interval established for its type. The variability of expansion strategies is therefore well represented when randomness is included in the model. This avoids having the same farm prototype replicated for the entire territory. Another advantage is the possibility of representing rare but realistic cases that are located at the extremes of the intervals (for instance, an agro-pastoralist having more than 40 hectares).

3.5.4. Possibilities of multi-scale analysis of agro-ecosystems

The main contribution of this approach is to open the possibilities of assessing scenario impacts at different organizational levels, with spatially explicit indicators. The various types of outputs (cf 3.1) at several organizational levels give an idea of the multi-scalar analyses made possible with models developed with the Ocelet approach for studying agro-ecosystems dynamics. The easy manipulation of scales allows assessing the effect of inter-scalar relations as well as combining elements at a larger scale with elements at a finer scale to describe a phenomenon. We presented a case study on plot distribution to illustrate these properties (cf 3.2.a.) e.g. the parameter of maximum distance between plots (farm level) is paramount for

describing the clearance process (subzone level). We showed that the proposed model allows assessing the effects of its variations at large scale (farm level, i.e. total maize production) as a result of finer scale effects (field level, i.e. maize production in each field).

Such an approach linking field (crop production), plot, farm, climatic subzone and regional levels has to our knowledge never been implemented. Previous studies have linked field level to farm level (Janssen et al., 2007) and further aggregated results to a regional level (Van Ittersum et al., 2008); or farm level to regional level (Faivre et al., 2004; Leenhardt et al., 2010; Verdkamp, 2001; Yun, 2003); and more recently, other studies linked plot level (only crop rotation), farm level, sub-regional and regional level (Blazy et al., 2015; Chopin et al., 2015; Houet et al., 2014). The innovative scale transitions implemented in our method enable models to link two fundamental aspects of an agro-ecosystem: land production that concerns the biological development of vegetation, and land use and land cover. It is essential to take into account the interactions between land production and land use and cover in order to have a complete approach of agro-ecosystems dynamics. Indeed, land use and land cover determine the value of the land production generated, which, in turn, drives land use and land cover changes. For instance, in the model presented, a link is created between land production and land use and cover in the process of the crop allocation strategies; e.g. the farmer allocated crops at year $n+1$ according to the yields obtained at year n which will further influence the land production of the year $n+1$. Our approach enables such meaningful interactions to be accounted for in agro-ecosystems dynamics modelling.

3.5.5. Contribution to the Ocelet approach

Recently, several models have been developed with Ocelet in different disciplines like hydrology, urban planning, agronomy or ecology (e.g. Degenne and Lo Seen, 2016; Degenne, 2012; David et al., 2013; Lestrelin et al., 2013; Castets, 2015; Proisy et al., 2016). Land use and land cover changes in an agro-ecosystem were also modelled, focussing mainly on the loss of agricultural land to housing (Augusseau et al., 2015). The present model brings in a least two innovations. First is the use of interaction graphs to link spatial entities within processes across scales. The other one is the deployment of a crop model over a large area, knowing that crop models are normally used only at plot level. These demonstrate useful capacities of the approach that offer perspectives for multi-scale modelling in various disciplines.

3.5.6. Limits of the use of such agro-ecosystem model

An important limit of the model is related to the data being used. The modelling of complex temporal and spatial situations that involve different disciplines requires appropriate data that may not be available. Moreover, the temporal resolution of input data determines the output temporal resolution. For instance, the availability of demographic data collected on ten year census, will raise the question of a yearly-step modelling of forest clearing depending on yearly population movements. Similarly, the input data spatial resolution will affect the model results. As an example, plots which are spatially distributed around villages have been linked, as an approximation, to the closest village epicentre since the only data available is at the village level, potentially generating spatial uncertainty.

Another drawback is the lack of several elements which are significant for a complete analysis of the agro-ecosystem dynamics. Livestock farming activity is, for example, one of these

missing elements, which is only represented in the model when including transhumance corridors delimitation and specific management practices for plots managed by livestock farmers. Another missing element is the economic aspect of farm production. In our model, farmer income is not explicitly taken into account. Farmer objectives and strategies are known to be strongly influenced by income, but are modelled as based on crop production instead. Finally, matter flows (e.g. carbon, nitrogen...) are roughly represented, although they are essential for a correct assessment of land production (Agarwal et al., 2002), as well as cropping systems externalities, like chemical effluents, that are key elements of agro-ecosystems dynamics (Leenhardt et al., 2010). Technically, these last elements could be easily integrated to the model, however data is difficult to obtain.

Finally, as the main objective of this paper was to give an overview of the different outputs that can be generated with this type of model and to illustrate its potential use using case studies, the thorough calibration of the model was not considered essential. However, a model validation was carried out to ensure that the trends obtained were coherent with knowledge acquired on the ground or derived from remote sensing. A proper calibration of the model is ongoing, based on ground data collection in 2014 and 2015, but will be presented in a subsequent work.

3.6. Conclusion

A spatially explicit and multi-scalar model was developed to simulate changes in the agro-ecosystems of the Tuy province between 2000 and 2015. Three interacting processes are simulated: crop area expansion, crop rotation and crop production. Model inputs are mainly based on a literature review, composed for the most part of local case studies. Outputs are multiple spatialized indicators of changes at different levels. Examples of outputs presented in this article were measured metrics such as clearings intensity, crop areas and yields in the context of the farms, etc. Several simulations allowed testing and quantifying i) the impacts of plot distribution strategies in the face of climatic risk, ii) following practices consequences on farm organization, and iii) the implications of reduced credit for buying fertilizers. These simulations have been presented in this article as a way to illustrate analytical possibilities through this modelling approach.

From a methodological point of view, the case study of Burkina Faso proposed an alternative approach to address some scaling issues faced by modellers. The approach uses a cross-scaling method that model relations in space and time, taking into consideration feedback between elements at different scales. This was made possible by using interaction graphs for linking elements at different scales, using intermediate levels as well as introducing randomness in processes. Aggregation or disaggregation methods are thus avoided, apart for displaying results. However, several issues subsist as several important aspects of agro-ecosystems have not been taken into account. The risk is to increase uncertainties as complexity increases.

We started the article postulating that current modelling methods have difficulties to correctly represent drivers of change, mainly due to scaling issues. The approach presented proposes new possibilities for identifying and quantifying driving factors of agro-ecosystem changes, including those that are not spatially explicit like crop prices or the introduction of new crop varieties, without neglecting the substance that scales bring to the analysis of agro-ecosystems.

Such an approach is closely linked to remote sensing as it provides information on the landscape at different moments in time which could be used to initialise the model and to assess simulation results. For example, satellite derived indices could be used to readjust model parameters and to constrain model processes. Work is ongoing on the integration of remote sensing at different spatial resolutions into the modelling approach.

Acknowledgment

This study was supported by the SIGMA European Collaborative Project (FP7-ENV-2013 SIGMA -Stimulating Innovation for Global Monitoring of Agriculture and its Impact on the Environment in support of GEOGLAM- project).

The authors wish to thank the Meteorology Regional Direction of Burkina Faso and the AGRHYMET Center in Niamey, Sébastien Caillault (Agro-campus Ouest), Jacques Imbernon (CIRAD) and Myriam Adam (CIRAD) for providing information used in this study.

Chapitre IV :

Vers une amélioration
de la compréhension
des dynamiques passées
et futures de l'agroécosystème
de la province du Tuy



Chapitre IV : Vers une amélioration de la compréhension des dynamiques passées et futures de l'agroécosystème de la province du Tuy

Ce chapitre porte sur l'utilisation thématique du modèle développé au chapitre précédent. Il répond à la question des **informations apportées par l'outil de modélisation sur les dynamiques passées et actuelles de la zone d'étude et interroge les perspectives pour les dynamiques futures.**

Deux axes des systèmes d'alerte précoce seront abordés sous forme de deux articles :

- Axe 1 : suivi prospectif sur le long terme des dynamiques de changement des zones agricoles.

Bien que cet axe ne soit pas le plus développé par les systèmes d'alerte précoce, les enjeux auxquels il répond sont de taille. L'anticipation des plausibles évolutions des dynamiques des agroécosystèmes et de leurs conséquences est essentielle pour prendre les mesures nécessaires pour le maintien et l'amélioration de la sécurité alimentaire des populations dans le futur.

Dans la province du Tuy, le changement le plus marqué dans les paysages a été une avancée du domaine cultivé aux dépens des surfaces en végétation naturelle. Aujourd'hui, l'espace est saturé de cultures, la végétation naturelle est réduite aux zones protégées et à quelques enclaves laissant craindre leur disparition progressive. Ces pressions sur les ressources sont à l'origine de tensions grandissantes entre les acteurs du territoire, ravivant d'anciens conflits ethniques.

Nous avons donc axé le premier article de cette partie sur **les dynamiques d'évolution de la végétation naturelle**. Il explore les dynamiques de défriches ayant eu lieu ces quinze dernières années et envisage des scénarios possibles pour les années futures.

L'article a été soumis à la revue Land Use Policy.

- Axe 2 : prévision des productions agricoles au cours de la saison à venir.

La détermination de la production d'une culture se fait par le produit des surfaces emblavées en cette culture et des rendements. Des méthodes sont développées pour évaluer de manière prospective ces deux composantes de la production, de manière à savoir avant même le début de la saison si les productions risquent de manquer. Cependant, si des efforts sont faits pour

améliorer les modèles de prévision des rendements, les estimations prospectives des surfaces de chaque culture sont pour l'instant peu étudiées. Ces estimations réalisées par les systèmes d'alerte précoce sont faites via l'analyse de données statistiques issues d'enquêtes de terrain, de suivi des marchés et de données satellitaires (Vintrou, 2012). Ces méthodes fournissent des ordres de grandeur des surfaces emblavées annuellement pour chaque culture mais offrent des possibilités limitées pour anticiper les variations de surface en culture d'une année sur l'autre. D'autre part, l'étude des facteurs influençant les changements de proportion des cultures d'une année sur l'autre est pour l'instant peu avancée.

Le second article de ce chapitre concerne les **dynamiques d'assolement ayant eu lieu dans la province du Tuy**, et vise à comprendre les variations des cultures dans les assolements d'une année sur l'autre. L'étude part du postulat que la compréhension fine des stratégies d'assolement des agriculteurs en fonction de facteurs externes pourrait permettre d'anticiper les surfaces dédiées aux différentes cultures. Ces dynamiques d'assolement visibles à l'échelle régionale dérivent directement d'une décision prise par les chefs de chaque exploitation agricole individuelle. Dans l'optique d'analyser les tendances d'assolement à l'échelle régionale, l'étude est axée sur les processus de prise de décision des agriculteurs.

L'article est actuellement en cours de préparation en vue d'une prochaine soumission.

Un court résumé en français de l'article 2 est tout d'abord réalisé, puis les articles 2 et 3 sont présentés.

1. Résumé de l'article 2 : Analyser les futurs plausibles sur la base des processus passés d'évolution des paysages, à l'ouest du Burkina Faso

Dans un contexte de modifications accélérées des paysages dues à l'activité humaine, l'ancien débat « Malthus vs. Boserup » est plus que jamais d'actualité. Alors que Malthus (1778) défend la théorie d'un épuisement des ressources proportionnel à la croissance démographique, Boserup (1965) postule qu'une augmentation de la population accélère le développement des innovations techniques qui permettent l'optimisation de l'exploitation des ressources naturelles. L'article illustre ce débat en prenant l'exemple, dans la province du Tuy au Burkina Faso, des dynamiques de défriches ayant eu lieu ces 15 dernières années. L'objectif de l'article est d'explorer des scénarios futurs d'exploitation de la végétation naturelle, en utilisant un modèle spatial pour comprendre les processus à l'origine des changements passés et prospecter les différentes options d'évolution.

La méthode se divise en deux étapes principales :

- i) La création d'un modèle, développé sur la base des conclusions d'une étude de terrain préalable des dynamiques passées en matière de défriches ; sa validation par comparaison avec les images satellitaires.
- ii) L'utilisation du modèle pour approfondir l'étude des processus passés et futurs :
 - Analyse des dynamiques des quinze dernières années en comparant plusieurs scénarios et en évaluant le poids des différents processus en jeu.
 - Exploration des possibles évolutions futures, en simulant différents scénarios prospectifs dans le but d'estimer leurs impacts sur la végétation naturelle et de comparer les différentes mesures pouvant être instaurées.

1.1. Résultats liminaires : Construction et évaluation du modèle à partir des études de terrain

L'analyse de cartes de changements issues d'images satellitaires a permis d'estimer la perte à 100 000 hectares de végétation naturelle en 15 ans. Cette importante déforestation a été majoritairement menée de manière fragmentée, ce qui marque un tournant avec les anciennes logiques de fronts pionniers.

Les études de terrain ont permis d'identifier les facteurs responsables de ces défriches. Les deux processus principalement en cause sont l'augmentation de la surface des exploitations et la création de nouvelles exploitations (par nucléarisation ou installation de migrants). Ces deux processus sont issus de la combinaison complexe d'une multitude de facteurs (démographiques, techniques, économiques, sociétaux, politiques, climatiques, etc.) (fig. 35). La plupart de ces facteurs et processus s'exprimaient déjà avant la période étudiée, mais dans

une moindre mesure et dans un contexte d'abondance des terres agricoles bien différent des réalités récentes.

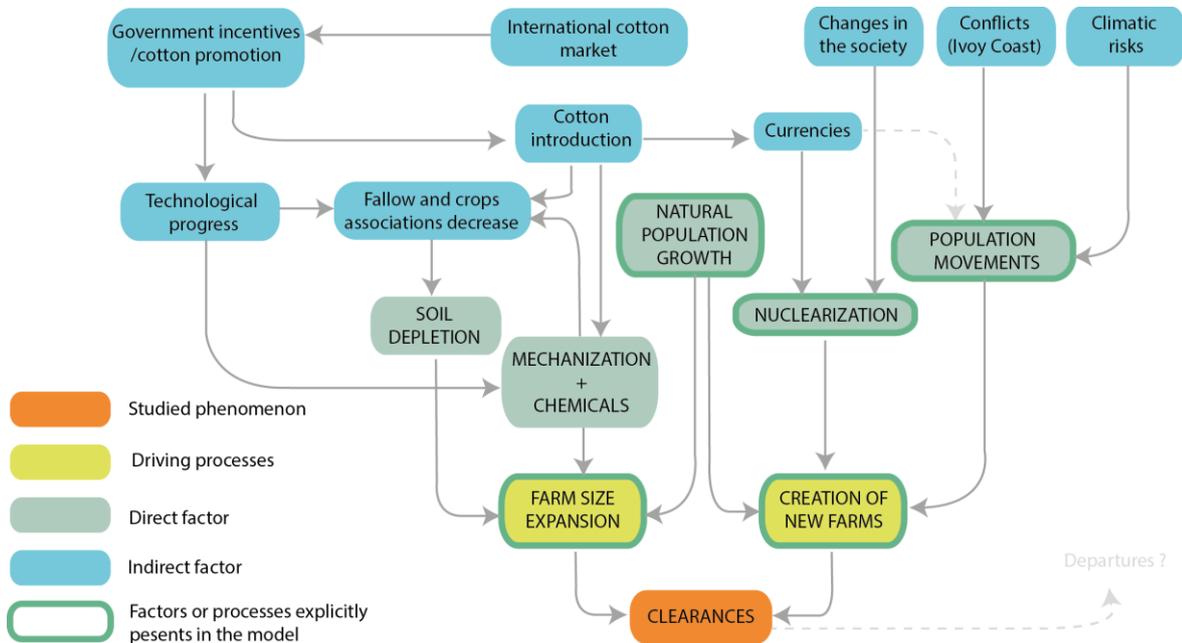


Figure 35: Liens entre les facteurs à l'origine de la déforestation.

La quantification de l'agrandissement des exploitations en fonction de leur type a été réalisée par Marre-Cast and Vall (2013). L'estimation de la création de nouvelles exploitations découle des données de recensement de la population.

Le modèle est construit à partir de ces analyses et simule, avec un pas de temps annuel, l'évolution des superficies des exploitations, la création de nouvelles exploitations et la disparition ou division d'exploitations.

La comparaison entre cartes de défriches simulées et cartes de changements issues de données satellitaires a abouti à une erreur moyenne de -4.43 % avec un écart type de 19.5%.

1.2. Résultats : analyse des changements passés et prospection du futur

Concernant les défriches ayant eu lieu ces quinze dernières années (fig.36), les résultats issus du modèle ont montré que le processus de nucléarisation des exploitations est à l'origine de 46% des défriches, celui d'agrandissement de 44% et l'installation des migrants représente 10 % des cas.

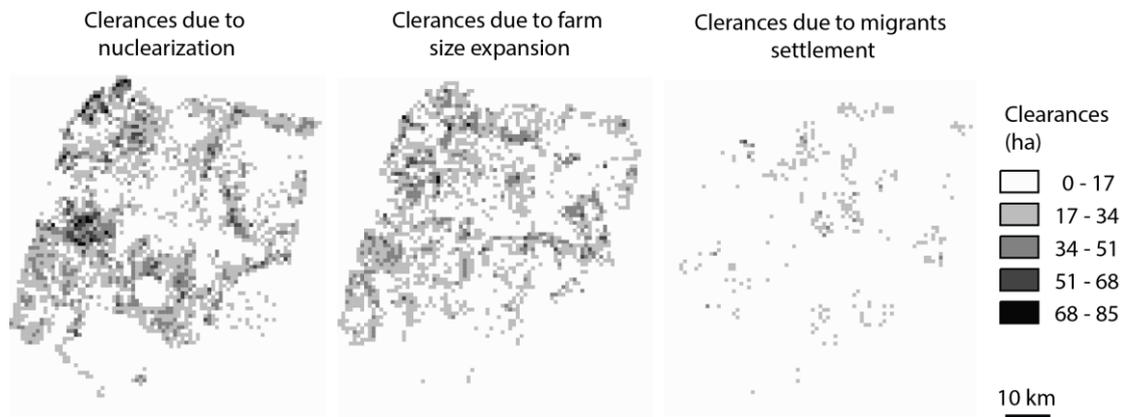


Figure 36: Résultats concernant les facteurs responsables des défriches.

La comparaison des deux scénarios a ensuite été réalisée dans le but d'étudier les critères choix des zones à défricher. Dans le premier, les exploitants choisissent les terres à défricher en fonction de leurs caractéristiques (sol, pente, accessibilité), alors que dans le second, le seul critère retenu est la distance de la parcelle à l'exploitation. La carte issue du second scénario est la plus proche des cartes de changements issues des données satellitaires (fig. 37). Ce résultat suggère que les propriétés des parcelles à défricher ne sont plus considérées dans le choix des défriches. La priorité serait de défricher les rares terres encore disponibles, leur caractéristiques étant secondaires.



Figure 37: Résultats des scénarios concernant les critères de localisation des défriches.

Enfin, les résultats du modèle ont permis de mettre en avant la dimension inter-villageoise des défriches récentes. Nous avons comparé deux scénarios qui diffèrent en fonction de la possibilité qu'ont les exploitants de défricher des terres situées dans les villages voisins des leurs. Le scénario dans lequel les exploitants peuvent défricher dans les villages voisins produit des cartes de défriches plus proches de la réalité (fig.38). Cela confirme l'hypothèse d'un

échange de terres entre villages, dont quelques cas avaient été observés sur le terrain. Ces demandes de terres se font des petits villages vers les plus grands, les petits étant plus rapidement à court de terres disponibles.

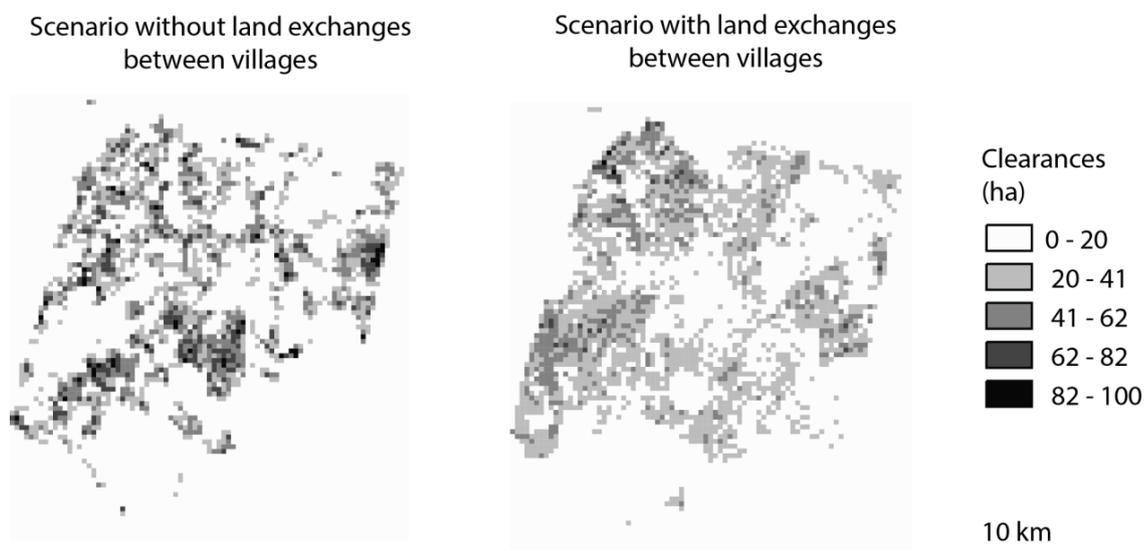


Figure 38: Cartes d'intensité des défriches simulées par le modèle en fonction des différents scénarios rétrospectifs.

Dans le but d'appréhender les évolutions possibles de l'extension du domaine cultivé, nous avons simulé différents scénarios allant de l'année 2014 à l'année 2040 (fig. 39). Les scénarios prospectifs postulant que les dynamiques récentes vont continuer pour les années à venir prévoient une défriche de 70 à 80% de terres encore disponibles en 25 ans. Un scénario dans lequel la moitié de la population émigre évalue la disparition de la végétation naturelle disponible restante à 14%.

Trois interventions - ou adaptations futures plausibles – ont alors été simulées pour imaginer ce qui pourrait être fait pour juguler les tendances à venir, sans contraindre les gens à émigrer (fig.40). La première mesure proposée est l'instauration de zones naturelles protégées supplémentaires. Les résultats montrent que si cette alternative permet un léger ralentissement des défriches, elle limite l'accès à la terre pour tout le monde et n'empêche pas les émigrations.

La seconde mesure est l'établissement d'une régulation démographique. Le modèle simule une diminution de la déforestation de 6 à 30 % par rapport aux scénarios d'évolution sans régulation.

Une dernière transformation serait une évolution des systèmes de production vers des systèmes plus productifs par unité de surface, permettant de diminuer les surfaces des exploitations tout en maintenant - ou en augmentant- le volume de production. Les résultats ont montré qu'il faudrait pour cela diminuer les surfaces d'au moins la moitié pour espérer réduire la déforestation de 80%.

Le scénario le plus prometteur est celui qui simule cette transition des systèmes de production accompagnée d'une régulation de la croissance démographique.

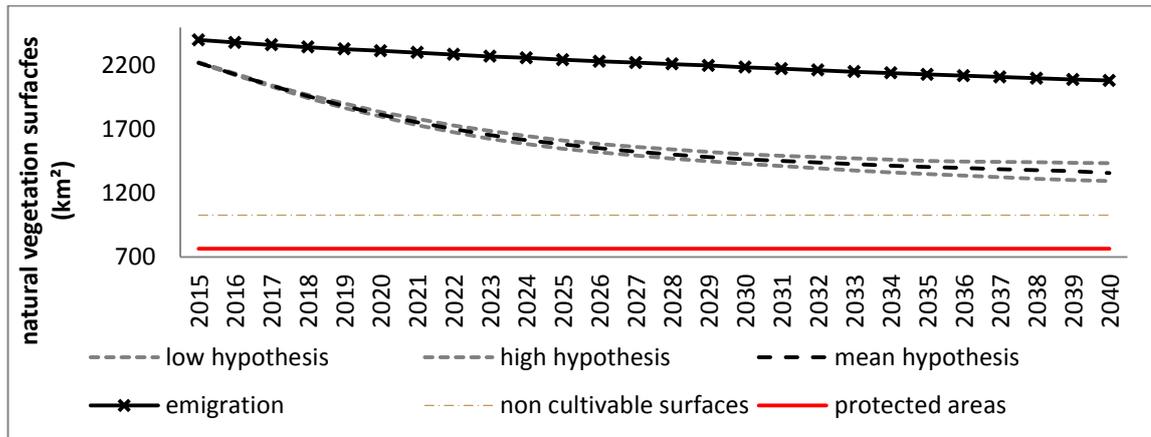


Figure 39: Evolution de la végétation naturelle en fonction de différents scénarios d'évolution de la population.

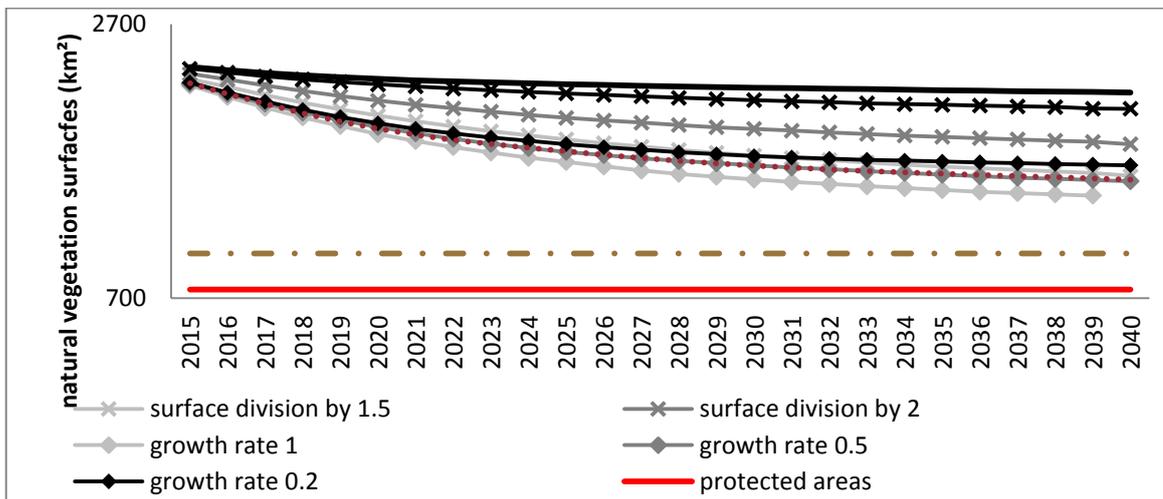


Figure 40: Evolution de la végétation naturelle en fonction de différents scénarios de mesures pouvant être prises ou d'adaptation des populations.

1.3. Discussion

À l'issue de ces résultats, cinq points ont été discutés :

- Les limites de l'approche : l'imprécision des données

Plusieurs imprécisions résident dans les données utilisées pour l'étude, tant au niveau des cartes issues des données satellitaires que des données de recensement. Ces incertitudes doivent être gardées en tête pour l'analyse des résultats du modèle.

- Les dynamiques passées analysées à la lumière du débat Malthus/Boserup

Les rétrospections concernant les changements récents semblent dessiner une évolution malthusienne classique, avec un facteur démographique responsable de l'épuisement des ressources naturelles, et la proximité du seuil malthusien.

Certains éléments nuancent cette vision, notamment l'introduction du package technique accompagnant le coton dans les années 90, qui a entraîné une intensification des systèmes de culture sur le modèle boserupien. Ces innovations n'ont pourtant pas contribué à une diminution des surfaces cultivées, et la situation qui se profilait comme un scénario boserupien a finalement évolué vers le scénario malthusien.

Un autre point vient toutefois nuancer la vision malthusienne : les facteurs d'extension du domaine cultivé semblent plus complexes que le seul facteur démographique. Les facteurs sociaux, techniques, économiques, politiques et climatiques viennent compliquer l'analyse des déterminants de changements, entraînant une vision plus globale des changements d'occupation du sol et amenant à dépasser le débat Malthus/Boserup.

- Les possibles évolutions, en l'absence de l'adoption de mesures

Une conséquence de l'épuisement des ressources forestières menaçant la province du Tuy, si les dynamiques actuelles se maintiennent, serait une importante émigration vers les villes ou vers d'autres régions ou pays possédant plus de terres disponibles. Un tel mouvement migratoire ne serait pas un phénomène nouveau en Afrique de l'Ouest, première région du continent pour les migrations internes. Les récents départs de plusieurs éleveurs montrent que ce mouvement migratoire a d'ores et déjà commencé.

Des études prospectives concernant les possibles zones d'accueil des migrants ont mis en évidence une région d'accueil potentielle, située entre le littoral sud et la frange sahélienne.

- Les conditions pour une transition agraire

La transition agraire, qui implique une intensification en production des systèmes de culture, peut être réalisée de plusieurs manières. Le modèle productiviste déjà appliqué en Afrique de l'Ouest a montré qu'il n'était pas adapté à l'agriculture paysanne de ces régions. L'intensification écologique est plus appropriée puisqu'elle consiste à augmenter les productions tout en préservant les ressources naturelles.

L'agro-écologie pourrait permettre une diminution des surfaces, puisqu'elle contribue théoriquement à une augmentation des rendements et de la valeur ajoutée par unité de surface. Mais les résultats ont montré qu'une division des surfaces réalisée de cette manière n'était toujours pas suffisante pour juguler la déforestation.

De plus, la question de la faisabilité d'une telle transition se pose. La transition écologique requiert en effet de profonds changements dans de nombreux domaines. Ils risquent d'être difficiles à réaliser dans le contexte actuel de filières très intégrées, de manque d'accès aux marchés et d'appauvrissement des sols.

Tous ces points suggèrent que, même si la combinaison d'une transition écologique et d'une régulation démographique semblent être des voies prometteuses sur le long terme, on peut se demander si ces deux changements peuvent être réalisés assez rapidement pour répondre à la menace d'épuisement des ressources forestières.

- Les incertitudes par rapport à ces prospectives, dues à la simplification du modèle

Le modèle simule une vision simplifiée de la réalité, qui peut engendrer d'importants biais. Ainsi, les phénomènes de départ ou de vente du bois n'ont pas été directement pris en compte, dans un souci de simplification du modèle.

Une autre limite de l'approche est due à l'omission de certains phénomènes ayant lieu à des niveaux d'organisation supérieurs, et ayant un impact sur les dynamiques étudiées (les incidents climatiques dans d'autres régions du monde, les dynamiques urbaines, l'apparition d'un produit concurrent...).

Enfin, ce que Lambin (2011) appelle « l'effet retour » est difficilement évaluable avec le modèle, bien que sa prise en compte soit importante dans les études prospectives.

En conclusion de l'article, la nouveauté de l'approche réside dans l'utilisation d'un modèle spatial pour quantifier les phénomènes ayant eu lieu et proposer des ouvertures sur ce qui pourrait éventuellement se passer dans le futur. Il tire la sonnette d'alarme sur l'urgence de la situation actuelle, tout en suggérant que les tendances les plus pessimistes ne sont pas inéluctables. Les éviter demande néanmoins d'opérer de profonds changements.

Le cas d'étude peut être mis en perspective avec d'autres zones d'Afrique de l'Ouest ayant connu des évolutions similaires, pour discuter des solutions proposées et s'inspirer de mesures déjà mises en œuvre ailleurs.

2. Article 2: Analyzing plausible futures from past patterns of land change in West Burkina Faso

Authors: Camille Jahel, Eric Vall, Alejandro Zermeno, Xavier Augusseau, Danny Lo Seen

Abstract

In a context of fast land changes due to human activity, the old “Malthus vs. Boserup” debate about human pressure on natural resources is more than ever a prevalent subject. We illustrate this debate with an example based on the Tuy Province in West Burkina Faso, which has known an important development these last fifteen years, as mainly observable in the major regression of its natural vegetation.

The objective of this article is to question the possible future scenarios of this region, by using a spatial model to understand past land change mechanisms and prospect plausible future ways of development. In particular, the spatial model describes the vegetation clearance processes identified during field campaigns, which we used to draw prospective scenarios and assess their possible effect on natural vegetation evolution.

The processing of remote sensing images helped us reveal that one quarter of the total study area was cleared during the last fourteen years. Surveys carried out in the field enabled the identification of the three main processes responsible for these changes: farm size expansion, creation of new farms due to family nuclearization and migrant settlement. The model was then built to reproduce these three processes, and was validated by comparison with the land use classification of remote sensing images. Our model was also used to explore past clearance mechanisms: we found that 90% of the clearance was shared equally between farm size expansion and nuclearization processes, the settlement of migrants being responsible for less than 10% of the clearance. Model outputs also showed a shift in the clearance schemes compared to ancient practices: land characteristics are no longer considered when land is cleared and now clearances also occur in neighbouring villages with available lands. These results suggest that the region has finally evolved similarly to a Malthusian rationale, even if the past dynamics resulted from a complex combination of factors.

Finally, we analyzed several prospective scenarios to assess the impacts of i) different population evolutions (normal demographic growth, emigrations and demographic regulation), ii) the implementation of protected areas in each village, iii) an ecological intensification of farming systems. Two possible solutions for reducing natural vegetation clearance in the region are discussed: Emigration to other regions or a demographic regulation accompanied with a progressive conversion of agricultural systems to agro-ecology. However, the question remains whether such changes can be accomplished rapidly enough to abate the pressing deforestation threat and to maintain an acceptable livelihood in the region.

2.1. Introduction

The last fifty years have seen a remarkable acceleration of land changes, with estimates of global cropland expansion of more than 10 million km² at the expense of natural vegetation (Lambin et al, 2001). At the beginning of this century, as much as 50% of ice-free areas had already been transformed (Turner et al, 2007; Vitousek et al., 1997; Haberl et al., 2007). A more recent study estimated that 2.3 million km² of forest land were lost between 2000 and 2012 and 0.8 million km² of new forests were gained (Hansen et al, 2016). Much of the land changes result from anthropogenic causes, due to the expansion of cropland and pasture lands (Lambin and Meyfroidt, 2011; Tilman et al., 2001; Goldewijk, 2001; Green et al., 2005; Ramankutty et al. 2007).

Among the important literature and theories inspired by human-induced transformation of the natural environment, probably the most famous proposed was by Malthus in 1778. He postulated that exploitation of the natural environment is proportional to demographic growth, implying that populations cannot exceed a threshold that depends on available natural resources. On the contrary, Boserup (1965) argued that population growth leads to an optimization of natural resources exploitation, along with a boost in technical innovation. For example, population increase in low density areas where traditional practice is slash-and-burn has led to intensified cropping systems (with more investment in labour or capital per unit surface area). Intensification enabled populations to grow with reduced damages on natural resources. Examples assessing either theory are numerous, leading to the emergence of another thesis where human history is seen as a succession of Malthusian and Boserupian situations (Palliere, 2013). The shift between a Malthusian rationale to a Boserupian one is called “Agrarian transition” (Jouve, 2006).

More recently, several authors showed that such approaches linking demography and natural resources use innovation were not sufficient to explain land changes (Angelsen and Kaimowitz, 1999; Leach and Fairhead, 2000; Lambin et al, 2001; Cochet, 2004). These are triggered by a complex combination of natural, economic, political, institutional, technological, cultural and demographic factors (Lambin et al, 2001). In the context of globalization where interconnections between places and people are exacerbated, causal relationship patterns induced by the combination of factors are often amplified, hence the observed surge in cropland expansion and forest conversion (Lambin and Meyfroidt, 2011; Lambin et al., 2001). With land change acceleration, the question of agrarian transition, or the capacity of populations to react and adapt to their changing environment, is crucial.

Understanding past mechanisms and combinations of factors that have led to the current land configuration is paramount in order to draw and assess future evolution trends (Stéphenne and Lambin, 2001; Licker 2010) that diverge from a Malthusian scenario.

In the present study, we identify and describe past land change mechanisms of the last 15 years in the Tuy Province, of the cotton region of West Burkina Faso. These mechanisms in turn suggest plausible futures of the populations in the study area, the threats they face and the choices available to them. The recent and future trends are investigated using remote sensing images, field survey and spatial dynamics modelling. Backward and forward land change projection scenarios generated by the model can then be assessed according to the previous theories. The study area was chosen for the recent important trends which are characteristic of cereal producing regions of West Africa: an important population growth and the introduction

of new cropping practices. The main land change was an expansion of croplands at the expense of natural vegetation. Today, the province is going through a pivotal period, as it is currently facing natural resource depletion, and is bound to experience critical occupancy issues with a predicted doubling of the population within the next thirty years (Tallet, 2007). Cropland saturation is close, with natural vegetation reduced to few enclaves or protected areas, and pastures limited to uncultivable pieces of land. Soil depletion due to over exploitation of lands has huge consequences on smallholder farmers who must resort to more fertilizers and chemicals to compensate for yield decrease. The farmers are also impacted by forest decline, as they depend on dry forest for timber, fuel, wild foods, medicinal herbs and ecosystem services like soil recovery or water management (Djouidi et al, 2015). The increasing number of conflicts over resource access, reviving buried ethnical tensions, is an alarming indicator of this critical situation. This highlights the urgent need for measuring these mutations in order to anticipate their consequences and limit their impact.

After describing the data used for the study and the spatial dynamics model structure, we quantify recent land changes and identify driving factors that are integrated in the spatial model. The contribution of each factor to the observed trends can thus be quantified and different hypothesis of past deforestation patterns tested. We also simulate prospective scenarios according to different predictions of population growth where possible solutions to reduce future overexploitation of natural resources can be assessed. Among them, the agro-ecology transition, an increasingly promising prospect, is tested as a way to sustainably contain cropland expansion trends. Finally, the discussion part replaces the backward and forward projections in the Malthus vs Boserup debate to assess different possible paths of agrarian transition.

2.2. Material and method

2.2.1. Study area

Tuy is a province of 5600 km² and is an old zone of agricultural colonization of Burkina Faso. 50 % of the area was cropped domain in 2014 and 16 % was dedicated to protected forest (fig.41). With a Sudanese climate and the soils mainly ferruginous, the natural vegetation is dry forest, composed of bushes and trees.

Today, around 80 % of the farms are less than 10 ha in size with some draft animals, 15 % are agro-pastoralists with up to 30 ha and a cattle herd. The lasts 5% are livestock farmers with less than 6.5 ha, a herd of 10-50 heads (Marre-Cast and Vall, 2013). The dominant crops are cotton, maize and sorghum, the proportions of which vary within each farm depending on its type.

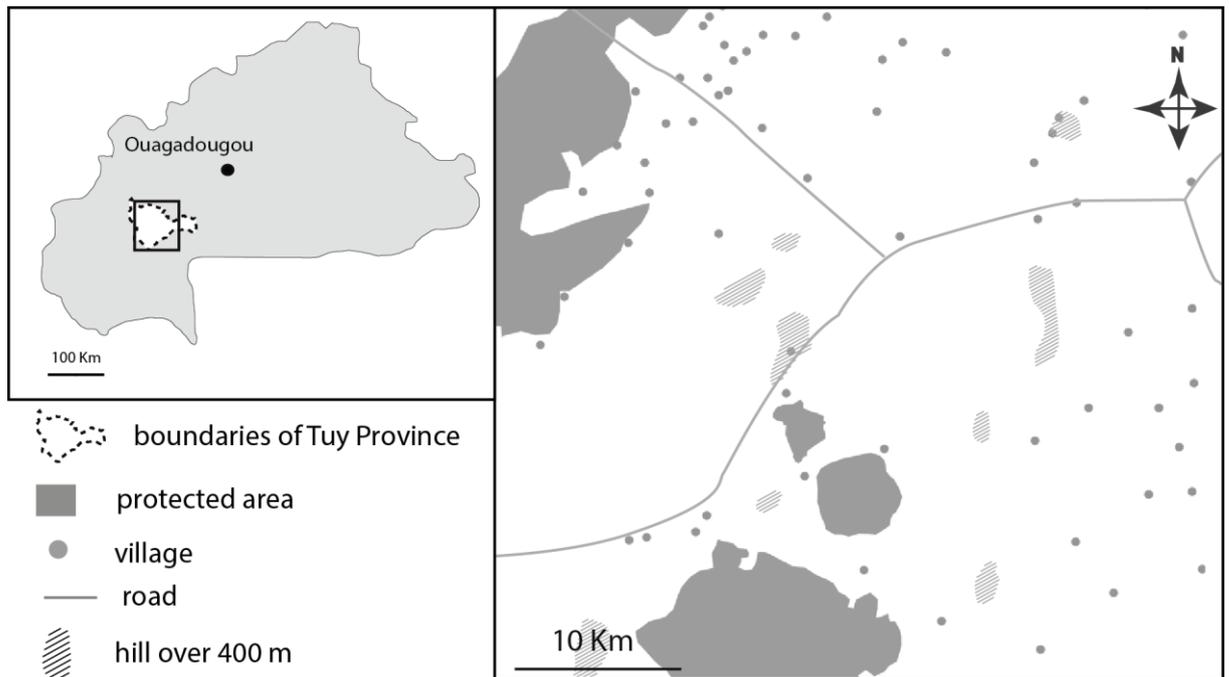


Figure 41: Localization of study area.

A brief overview of the history of the zone is necessary to understand the recent evolutions. During the colonization period, the main cropping systems were itinerant, with fallows of more than ten years. Those entirely manual systems were based on cereals associations (sorghum, mil, black-eyed pea, peanuts...). The region witnessed its first notable transformations after the independence in 1960. An important campaign for cotton promotion began, when farmers benefited from chemical and new seed subventions, and the first ploughs were introduced. The cotton crop was rapidly adopted in the 70's, causing deep changes in farming systems. The crops associations were replaced by cotton-maize rotations in order to facilitate mechanization. Fallows gradually decreased and more chemicals and organic fertilizers were used to maintain plot productivity. The plough facilitated the expansion of cropped areas to soils that were previously too hard to be cultivated. At the same time, the Tui province saw two important arrivals of migrants from the northern Mossi plateau, mainly the consequence of two droughts in the Sahelian regions, in the 70's and the 80's. The migrants typically settled around the autochthonous villages, primarily on the poorest land, and contributed to the clearance of new land. This period witnessed a spectacular demographic growth, resulting in the first important trend in deforestation of the zone. By the early 2000s, this old zone of agricultural colonization had already known important mutations, and the deforestation process had already started (Augusseau, 2007; Bainville and Dufumier, 2009; Caillault et al., 2012; Diallo and Vall, 2010; Serpantié, 2003; Vall et al., 2006; Savonnet-Guyot, 1986). This deforestation was a "pioneer front", leading to the clearance of large surfaces of virgin lands (Tallet, 2007). It resulted in the control of wildlife forest and the reduction of its dangers (for instance, lions have now totally disappeared). This article aims at describing the evolution of the zone since the year 2000, in the light of this particular history.

2.2.2. Material

a. Data derived from remote sensing images

Several maps have been produced from remote sensing data (Tab. 6).

The crop/non-crop area classification with the plot structure of the year 2000 has been produced from Spot5 and Landsat7 images (Jahel et al., 2016). Two other classifications have been obtained from Landsat images using the same object oriented method with the eCognition® Software. The precision of the year 2014 classification had been evaluated at 0.94, with a Kappa coefficient of 0.88. The other maps were not evaluated as we did not have reference data for the previous years. However, as the same methodology has been applied, they were considered reliable.

Table 6: Maps produced from several remote sensing products.

Product	classes	Source
Year 2000 crop/non-crop area classification with plot structure	Annual crops/ Natural vegetation/Urban area/laterite/water	Landsat7 archive images of April and November 2000 Spot5 image of January 2014
Year 2007 crop/non-crop area classification	Annual crops/ Natural vegetation/ laterite/water	Landsat 5 archive images of February and October 2007
Year 2014 crop/non-crop area classification	Annual crops/ Natural vegetation/ laterite/water	Landsat 8 archive images of April and October 2014
Gridded Changes map between 2007 and 2000	Natural vegetation progression/ Natural vegetation regression/ No changes	crop/non-crop area classifications of 2007 and 2000

b. Field data collection

Two types of investigations were carried out:

- Collective surveys were organized in 18 villages, involving the village chiefs and elderly persons. It was a semi-directive discussion aiming at: i) identifying changes that occurred during these last fifteen years, ii) identifying factors responsible for these changes, and iii) replacing these changes at the village scale on a remote sensing image (Landsat 2014).
- Individual interviews with 50 farmers aiming at understanding the particular trajectory of their farm, and their expansion strategy. The farm surfaces were collected and localized year by year, and factors of change were identified.

Others complementary data were collected (tab 7).

Table 7. Presentation data collected.

Data type	Spatial resolution	Temporal resolution	Source
Population	Epicentre	decade	RGPH 1996 and 2006
Soil	1 km ²		BDOT, 2007
Roads			BDOT, 2007
Farm type, strategies	30 historical surveys	Period between the year of installation and 2013	Typology described in Marre-Cast and Vall (2013)

The yearly population data (migrants and autochthonous) were derived from general census data in 1996 and 2006, that gives the total population of Tuy localities.

The annual number of migrants is estimated following this regression:

$$\text{Annual number estimated of migrants} = (\text{year 2006 total population censued} - \text{year 2006 autochthonous population estimated}) / 10$$

The division by a factor of 10 enables to distribute this difference of population on the 10 years, as we have the evaluation of the total population only for 2 dates, in order to have a linear growth of total population.

To estimate the “autochthonous population”, we used the natural growth rate to simulate the natural growth of the population from 1996.

$$\text{year 2006 autochthonous population estimated} = \text{year 1996 total population censued} * ((1 + 0.0313)^{10})$$

Another calculation enabled to approximate the annual autochthonous population added to the total population:

$$\text{Annual autochthonous population} = (\text{year 2006 autochthonous population estimated} - \text{year 1996 total population}) / 10$$

Here, “autochthonous population” refer to people living in the zone in 2000, and their descendants. It therefore includes ancient migrants settled in the Tuy province before year 2000.

2.2.3. Model structure

The model objective is to simulate the past fifteen years of land changes using factors and processes identified by the previous analysis. It was developed using the Ocelet language and simulation environment for modelling spatial dynamics (Degenne and Lo Seen, 2016). This language is based on interaction graphs. Graphs consist of entities, characterized by a set of properties, which are linked together by different kinds of relations (spatial, functional and hierarchical). When the different entities and their relations have been described, different

scenarios can be executed to make the entities evolve in time according to their relations. Other elements are added to those three concepts, especially the datafacers that allow the integration of external data to the model, including spatial data (Degenne, 2012). We used them to integrate the initial map of 2000 and the geo-referenced population data.

The model developed involved two types of entities: the Plot and the Farm. The plots were obtained from the datafacer of the plot structure of year 2000. They were then linked to the Farm entities to which they belong. Through this relationship, changes in the plots result in changes in the farms to which they belong. A scenario consists in an initialization phase that represents the spatial organization of the area in year 2000, and the annual loop that simulates the evolution of the cultivated area with an annual time step (Jahel et al., 2016).

2.3. Model construction and evaluation

2.3.1. Quantification of recent land change and identification of its factors

We localized and quantified land changes over the last fifteen years, producing the crop/non-crop area classification from six remote sensing images for the years 2000, 2007 and 2014. These maps show an annual deforestation rate of 2.4% between 2000 and 2014. In fourteen years, the total loss of natural space reached about 1000 km², representing one quarter of the study area. Maps underline the fact that even if deforestation was still important in the last decade, it marked a break from the previous type of extensive deforestation. The trend in the majority of villages is one of fragmented deforestation of land which was already partly cleared. Indeed, the majority of clearances occurred in already cropped areas, exploiting the numerous remaining wooded enclaves (fig. 42).

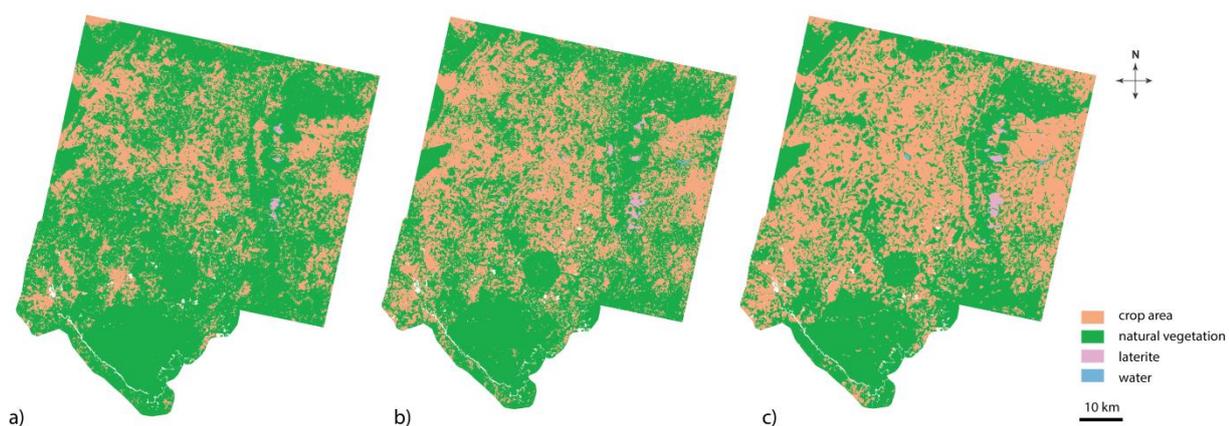


Figure 42: Maps of crop/non-crop area for the years a) 2000, b) 2007 and c) 2014 (the shape of maps is due to the extent of remote sensing images used).

The major processes driving these changes were identified both from literature and field investigations as: i) farm size expansion and ii) creation of new farms. Both processes themselves result from a complex combination of numerous factors (fig. 43).

Farm size expansion i) is in the first place a consequence of natural population growth. As families grow they generate an increasing labour force to cultivate additional surfaces. Another key factor in favouring farm expansion is the generalization of the use of new cropping technologies. The increase in work productivity due to the introduction of mechanization (plough, first tractors) and easier access to chemicals, enabled time saving, and allowed cultivation of extra land. These new cropping practices are in accordance with the dominant rationale of increasing productions by increasing sowed surfaces. This introduction and diffusion of new technologies and cropping techniques first occurred in the 70's with cotton, promoted by the government in order to bring currencies in the country through fibre export. The introduction of cotton has also been accompanied with the decrease or abandonment of ancient cropping practices that involved crops associations and fallow to restore soil fertility (Milleville and Serpantié, 1994). Without these practices, farmers are more and more dependent on chemicals to restore soil fertility, or on clearing other lands to have better soils. The quantification of the expansion of farms depending on their type was realized by Marre-Cast and Vall (2013) (Table 8.).

Table 8. Parameters of farm expansion

Type of farm	Evolution of surface (%)	Farms concerned (%)
	+113%	40%
F1	+60 %	40%
	- 26%	20%
F2	+113%	33%
	+60 %	33%
	- 26%	33%
AP1	+60 %	100%
AP2	+113%	100%
L1	+ 52%	80%
	+60 %	20%
L2	+ 52%	80%
	+113 %	20%

The creation of new farms ii) is due on one hand to population movement and on the other hand to family nuclearization. This nuclearization refers to the individual settlement of children on lands separated from the family farm (Savonnet, 1986). It started around the 60's and accelerated with the introduction of cotton. The increased income brought in the family by the sale of cotton fibres often triggered disputes between family members, causing some of them to move out. Changes in the society, with more opening to the outside world, have generalized this new way of life. Population movements were also responsible for new farm creation, although fewer migrants arrived in the last fifteen years compared to the two waves of migrations in the 70's and 80's. The demographic growth remained rapid mainly due to the descendants of migrants and natives. Between 2002 and 2010, the conflict in neighbouring Ivory Coast forced the return of many people, and the arrival of new migrants.

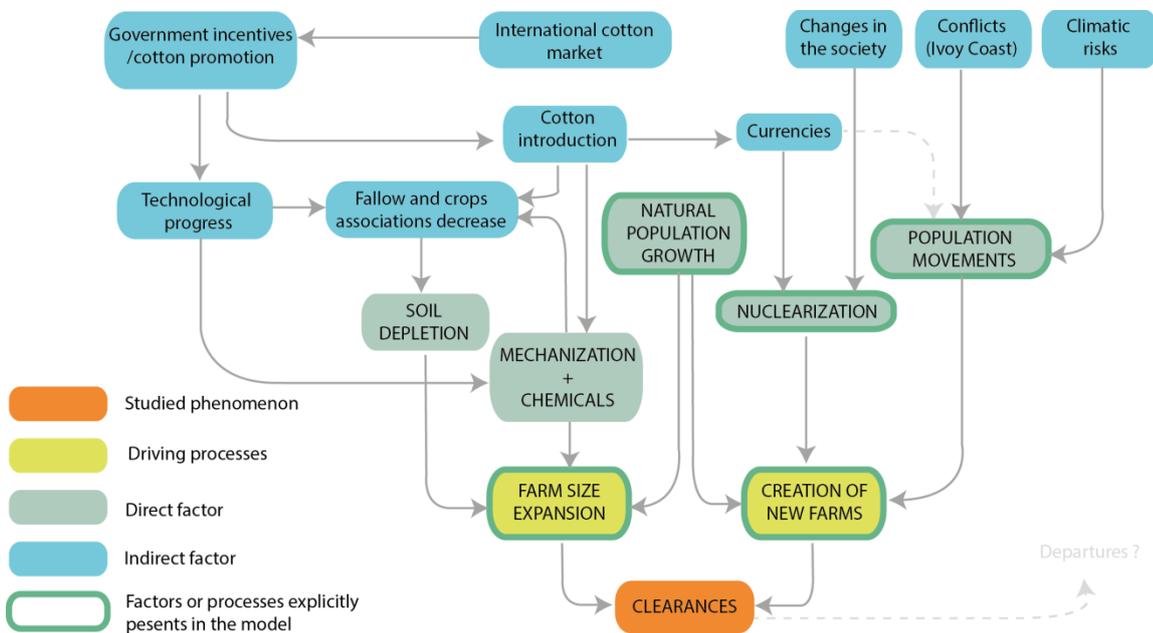


Figure 43: Interacting factors resulting in the processes of land clearing

Among the interacting factors listed above, many of them had already started before 2000. Nevertheless, the last fifteen years have been marked by the amplification of such trends (fig.44). Moreover, even if clearings had already started before the year 2000, available lands were abundant so that land pressure was not so strong. The study period is in the continuity of the dynamics started, but in a context where natural resources depletion is more acute, such that land use dynamics is at a turning point.

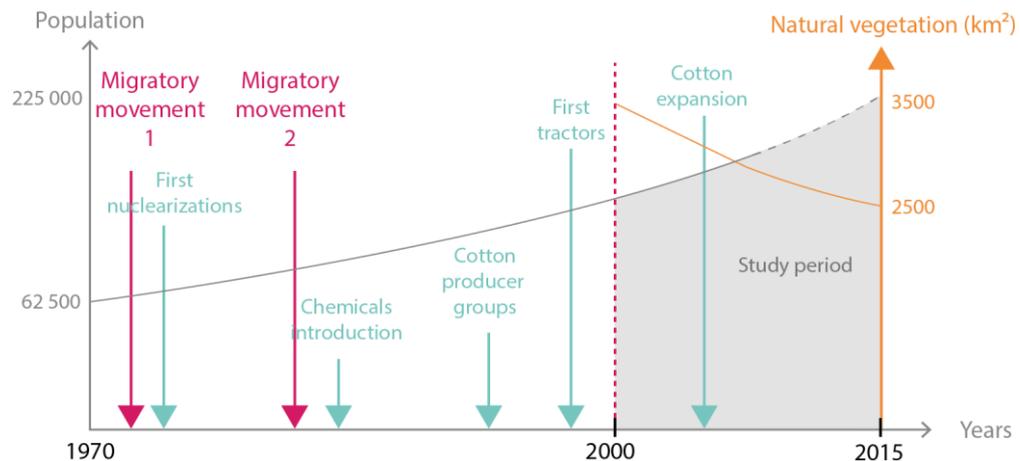


Figure 44: Chronological events that have led to land dynamics.

2.3.2. Building a model capable of reproducing these past patterns of land change

Disentangling the complex relations between all these factors, and accounting for their aggregative effects and retroactions, is a delicate exercise. The modelling approach enabled working in that direction through selective simplification of this complexity. Here for example, the complex causal chain presented above was modelled with only two processes: the farm size expansion and creation of new farms. The only factors that are quantified in the model are the population natural growth and movements. The other factors are not explicitly presented within the model, but only in simplified terms in relation with the two main factors.

In the model built, the main scenario begins with an initialization phase to represent the study area in year 2000, with the same crop area and respecting the proportion of the different types of farms. Three processes are then computed with an annual time step in order to represent the evolution of the cultivated area: farm surface expansion or reduction, farm disappearance and new farm creation (fig.45, Annexe 1). These processes are parameterized with field survey results.

The initialization:

The year 2000 crop/non-crop area map is used to define the plot entities. Each plot of the map becomes an individual entity in Ocelet, with its slope, status and accessibility rate (Jahel et al, 2016). The Farm entities are then created, first with blank properties. The « type of farm » property is given to each entity according to the proportion of the types of farm in the zone: 50 % of the Farm entities are farmers, 40% are agro-pastoralist and 10% are breeders. Each farm type has a range of size, and for each farm entity the property «area » is chosen randomly within that range. Then the Plots are added by connecting them to the farm in order to reach the farm area. The plots have to belong to the same village, and the maximum distance between them depends on the farm type.

The annual loop:

This part simulates the evolution of the cultivated area with an annual step. Three processes are taken into account: farms expansion or reduction, farms division and new farms creation.

- Farms expansion or reduction

A fraction (parameter of the model) of farms is chosen randomly to undergo expansion or reduction. A surface of evolution is determined as a function of farm area and type. This surface has been determined during the previous step of identification of past agrarian dynamics. Un-cropped Plots are added to the farm in order to reach this surface. The choice of these new plots depends on their localization and their property “attractiveness”. If the surface of evolution is negative, plots are removed from the farm.

- Farms division or disappearance:

In Burkina Faso, a farmer manages his farm during an average of 35 years. Thus, each year, 1/35 per cent of the farms entity is chosen to be divided between a random numbers of children. New farms are thereby created; their type is given in function of their total area and the type of the mother farm.

- New farms creation:

In each village, new farms are annually created, depending on population movements. The number of farms for each village is proportional to the migrants’ arrivals and to the annual natural population growth. These values in proportion are parameters of the model. This process is then similar to the initialization phase, as the farms are created empty and are filled with un-cropped plots.

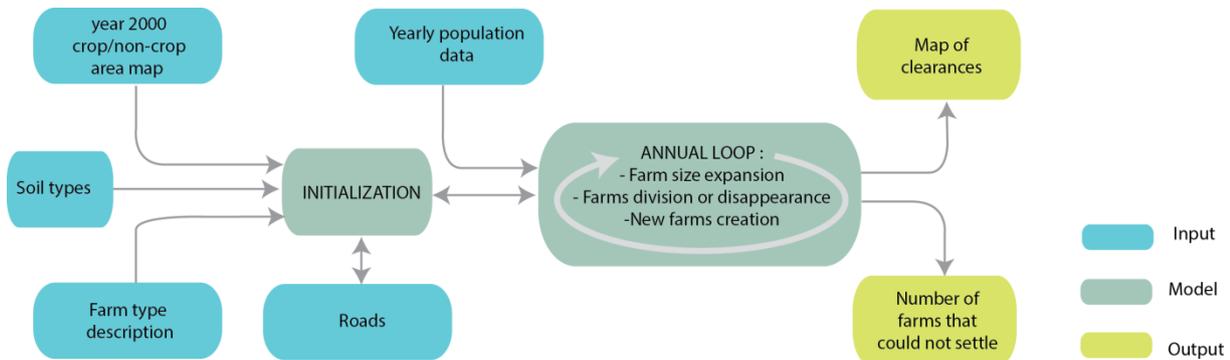


Figure 45: Model structure.

The model reliability is evaluated by the comparison of clearances simulated between 2000 and 2014 and maps produced from remote sensing data for the same dates. We found a mean error of -4.43 % with a Standard deviation of 19.5% between the maps.

The output map shows that the model was able to reproduce spatial heterogeneities of clearances. The model simulated no deforestation on the protected areas and the rugged

terrains (fig.46). The overestimation of deforestation by the model is mainly located in areas historically populated, regrouping a high density of villages.

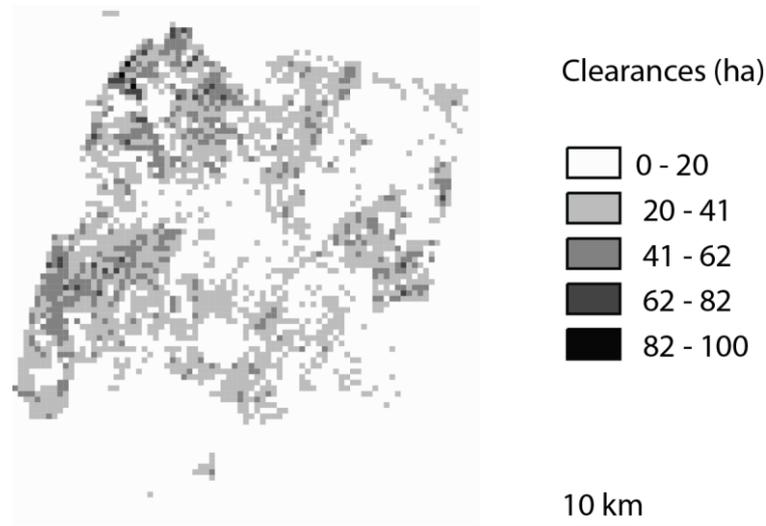


Figure 46: Map of deforestation intensity simulated by the model.

2.4. Results: Assessing past land change and prospecting the future

2.4.1. Understanding the past dynamics

Sensitivity tests showed that nuclearization is responsible for almost half of recent natural area regression (46 %). This process occurred mainly in zones historically more populated, in the North West and central West (fig. 47). The farm surface expansion has almost the same weight as it accounts for 44 % of the total deforestation. It occurred also in populated areas, with a higher density of farms. The deforestation due to migrants' settlement is much more localized. Two zones stand out, in the South East and in the South West (fig. 7), with a mean of 16 cleared hectares per square of 100 ha. These are less accessible zones, with few villages. A statement often heard consists in attributing deforestation and its consequences to migrants. While settlement of migrants' camps seemed to have played an important role in the former deforestation trend, results show that it is now negligible compared to the other factors. According to the model, only 10 % of the area cleared is caused by migrants' settlement.



Figure 47: Maps of deforestation intensity depending to sensitivity tests.

Another important change in the deforestation pattern highlighted by our results relates to the spatial direction of clearings (fig.48). We compared two scenarios to identify the criteria considered by farmers in order to choose which land to clear. In the first one, farmers choose lands according to their characteristics (soil type, slope, accessibility), whereas in the second one, the only criteria is the plot distance to the farm. The main difference between maps produced by both scenarios is the spatial distribution of clearances. While the intensification of deforestation in the second scenario is spatially gradual, clearances in the first one are more localized and concentrated on better lands. The map resulting from the second scenario showed better results when compared to the remote sensing results (mse of 30.9 for scenario 1 and 28 for the scenario 2). It suggests that while deforestation used to be guided by the “attractiveness” of the land, the role of land properties is no longer as important role in the choice of clearing. The new logic is to clear the rare available lands wherever possible, with land characteristics considered secondary.



Figure 48: Maps of deforestation intensity depending to the plot choice scenario.

This new type of forest clearing is also characterized by inter-village relationships (fig.49). We compared two different scenarios that differ on whether a farmer can have plots in neighbouring villages or not. In the scenario where farmers can have plots only in his village, we see that deforestation is very concentrated in some villages, particularly in villages of small size. The other scenario shows that deforestation is more spread out over the zone, which is closer to reality. These model results confirm the hypothesis of land exchange between villages, which was already observed in field surveys. Model simulation suggests that if inter-village land transactions did not happen, around 130 farms (representing 1000 people) could not have settled due to lack of space (Fig.50). With the progress of deforestation, smaller villages do not have enough land and farmers have to probe their neighbourhood. The field surveys also point out the emergence of land renting, an isolated phenomenon at the moment but still a sign of the appearance of new land statuses resulting from land shortages.

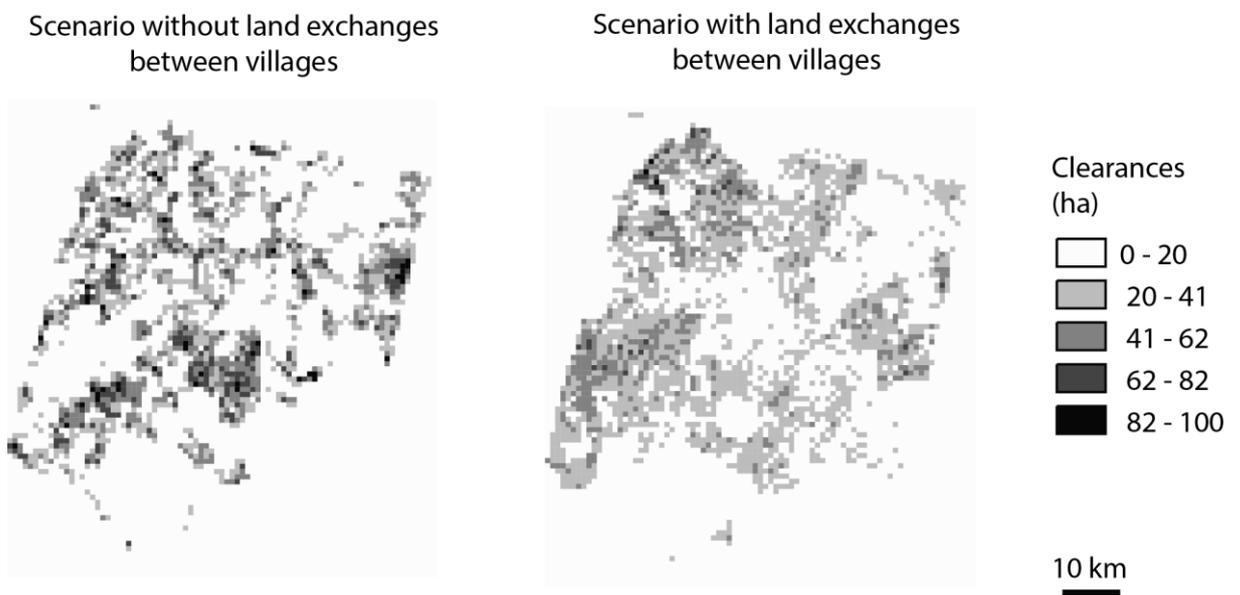


Figure 49: Maps of deforestation intensity depending to the land exchange scenario.

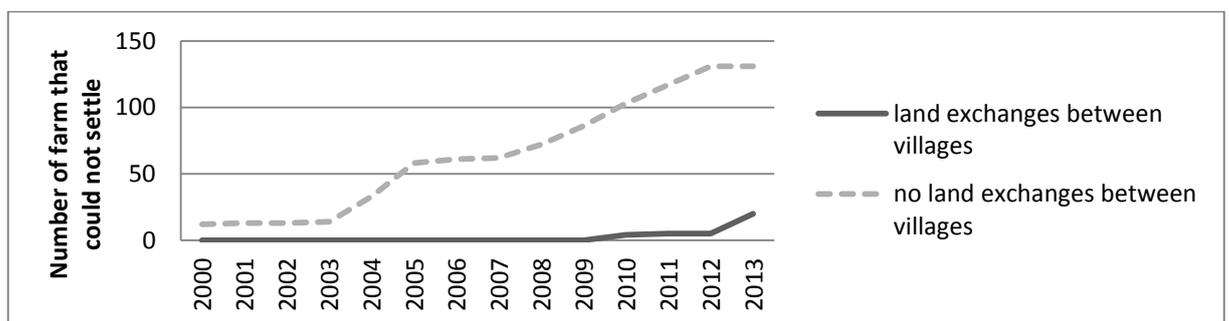


Figure 50: Number of farms that could not settle depending to the land exchange scenario.

2.4.2. Prospective scenarios

In order to assess possible evolutions of cropland expansion, we run different scenarios from 2014 to 2040. We used results of past patterns of deforestation (the same driving factors, no orientation according to land characteristics and possibilities of land exchange between villages) to simulate what could happen if the same types of dynamics persist.

Prospective scenarios postulating that current dynamics will carry on over the next years display clear simulation trends: between 70 and 80% of the remaining available non protected forest resources would be totally exploited within 25 years, depending on the population evolution hypothesis. (fig.11). One foreseen trend is an important emigration towards cities or other regions. We imagined a drastic scenario where up to half of the population present emigrates. To do so, we progressively reduced the surface of a part of existing farms by a factor of two, supposing that people would not abandon their farms, but rather children or family emigration would reduce the number of workers, hence reducing the surface area possibly cultivated. At the same time, we divided by half the yearly natural population growth. Results show that only 14% of the remaining available non protected forest is cleared if half of the population emigrates. (fig.51)

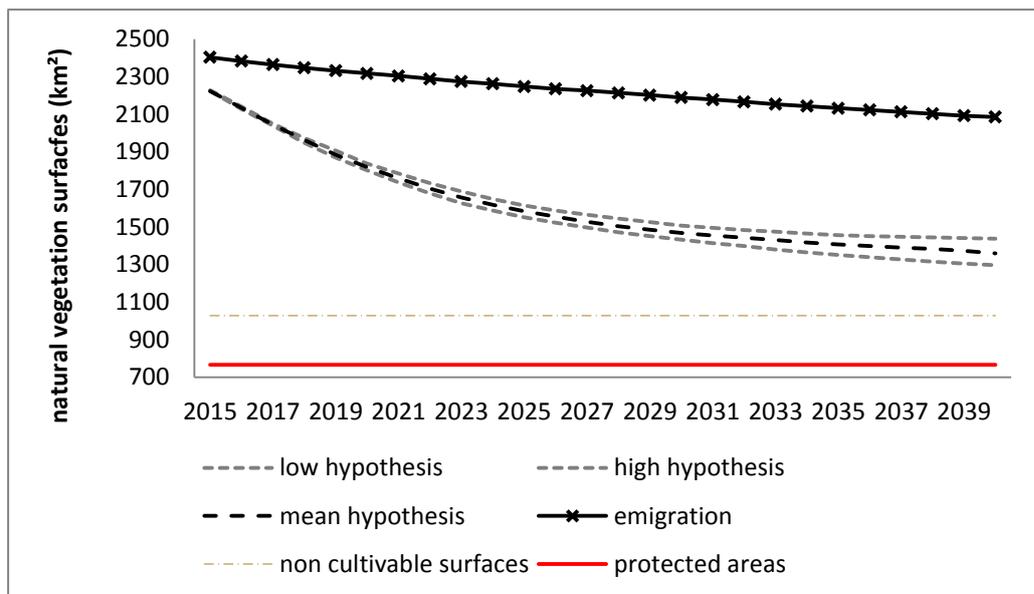


Figure 51: Evolution of natural vegetation areas depending on population growth and population emigration.

Then, we simulated three plausible future interventions or adaptations to mitigate this upcoming trend without important emigration. The proposed intervention, based on the understanding of past land change patterns, are i) the implementation of protected areas in each village, ii) demographic control and iii) an ecological intensification of farm systems.

- i) Results of the first proposition suggest that while it may slow down the disappearance of natural vegetation and favour rich soils (fig. 52), it does not allow land access for everyone and will not stop emigrations. Figure 53 shows that when compared to the demographic control scenario, similar trends are obtained (fig.

52), but the number of farms that could not settle because of lack of space is higher.

- ii) Considering that population growth is responsible for much of the deforestation, a demographic control is an interesting option. Model outputs show that it would slow down the deforestation by 6 to 30 percent, but it will not stop it.
- iii) Since the expansion of farm size is the other major factor of deforestation, the third scenario aims at questioning the actual farm systems. A plausible adaptation for farmers could be to find a way to produce the same (or more) quantity on smaller surfaces. We tested this transition by simulating a progressive conversion of the actual systems. The simulation is based on the variation of the surface needed to produce the same quantity as by current systems (for instance, surface is divided by two if we consider that a more intensive system is able to double yields). In this scenario, a new farm settlement occupies half less surface area (if the rate is 2) than compared to the reference scenario. Each year, a part of the existing farms is converted and reduces its surface area by the same ratio. Results demonstrated that such an adaptation could allow a population growth rate of 0.5 and diminish deforestation by 80 percent.

Finally, the simulation of the combination of both intensification of cropping systems and population growth control is the scenario where clearance is the lowest.

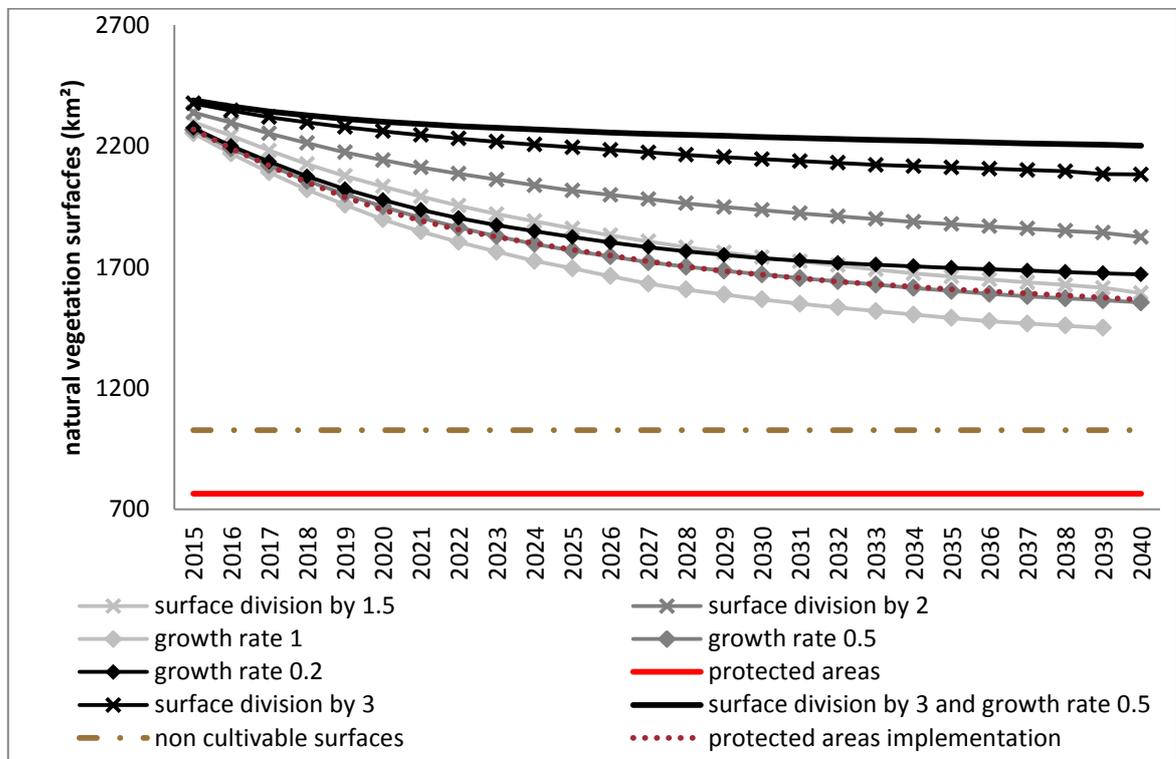


Figure 52: Evolution of natural vegetation areas depending on different measures implemented or population adaptation.

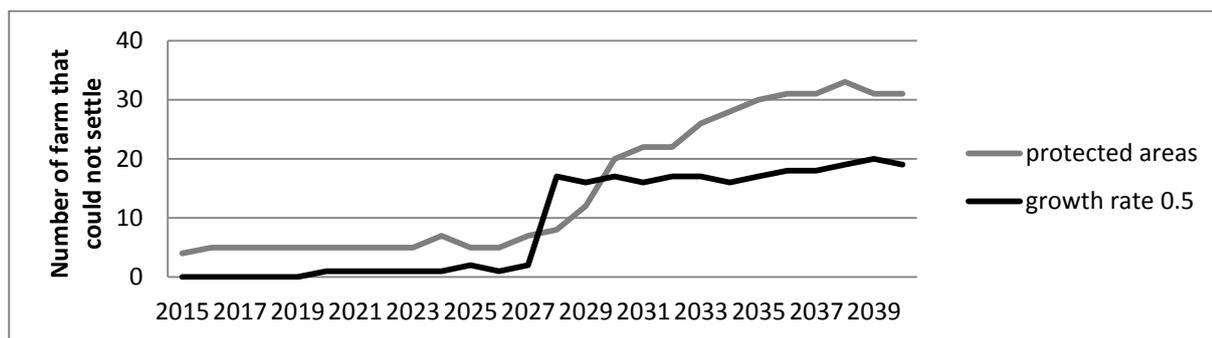


Figure 53: Evolution of the number of farms that could not be created because of lack of space.

2.5. Discussion and conclusion

2.5.1. Limits of the data used

In order to improve model reliability, we decided on an approach based on the crossing of several sources of information: field surveys, remote sensing as well as existing data (literature, census and map of soils). However, each of these sources has shortcomings and biases. An example is the accuracy of the maps used for model calibration and validation. The landscape of the zone is very complex, with fragmented forests and small size plots within which numerous trees are present. The classification of such a landscape is often challenging, even when using high spatial resolution images like Landsat (30 meters of resolution). Even if an acceptable level of errors was obtained in the classification of the year 2014, we could not evaluate the other maps, which also contain errors. Another uncertainty comes from the census data. We had to deduce the proportion of migrants from general population data. It is an approximation based on rational estimations, but it cannot have the accuracy of a real census. What we call migrants is in fact a positive anomaly of the censused population compared to the population growth. It does not give any information about the origins of the so-called migrants, who could also come from neighbouring villages. All these uncertainties have to be kept in mind when analyzing model results and simulations of future trends have to be analyzed with caution.

2.5.2. Past land change, a Malthusian scenario?

The backward projections on recent land change suggest a classical Malthusian evolution, with a demographic factor leading to the decrease of natural resources (nuclearization and migrations). The suggestion that nuclearization can be the first cause of deforestation is quite new, as this process has never been identified before for having such an impact on clearances. However, as this conclusion was inferred from model simulations, proper field studies are now required to go deeper in this issue. Model simulations revealed the proximity of the Malthusian threshold (where natural resources decrease), demonstrating that processes of cropland expansion were not driven by land characteristics anymore as lands become a scarce resource (cf III.1). Similarly, the example of exchange of lands between villages highlighted the increasing pressure on lands (cf III.1). It also marks a shift in the organization between actors

of the territory with the emergence of new types of transactions, as the traditional status of land (where land does not belong to anyone) being less and less tenable. A question is to what extent these new inter-village transactions could accelerate cropland expansion, especially if renting is generalized as it weakens village control on lands.

Nevertheless, this Malthusian vision of recent developments is balanced by an apparent contradiction: in the 90's, the sudden population growth and the introduction of new technologies leading to intensification (technologies linked to cotton crop like chemicals, plough) seemed to announce a Boserupian evolution. The fundamental difference with a Boserupian situation lies in the fact that innovations linked to the introduction of cotton did not come as a solution to a problem of land pressure but was led by other motivations (such as government export policy). Moreover, even if the new technologies introduced enabled yield increases, they did not lead to a decrease in cropped surfaces. Indeed, since the 90's, access to credits for chemicals is possible for farmers only if they commit to cultivate cotton (chemicals for 1 ha of maize are given in credit for 3 ha of cotton). As plough and chemicals helped to reduce the workload, it enabled cotton cropping on additional lands. Thus, a situation that profiled like a Boserupian one has finally evolved quite similarly to a Malthusian one.

Another point can be added to qualify this Malthusian vision of recent developments. Even if resources depletion occurred after an important population growth, drivers of the observed cropland expansion seemed more complex than the sole demographic factor (cf II.1). Firstly, the demographic effect has been amplified by a social factor: nuclearization results both from family enlargement and a new social organization where children do not live and work with their family anymore. The second more important driver of cropland expansion is the farm surface expansion (cf III.1), triggered by a combination of different types of factors. Among them, the demographic factor plays an important role as the increase in family size enables to increase labour force and so to expand surface areas. However, technological innovation is also a driver of this process, with the introduction of plough and chemicals enabling work productivity and surface area per capita increases. Here, we could refer to the work of Erlich and Holdren (1971) who introduced the weight of technologies on the environmental impacts of human activity. Again referring to the cotton example, even if the cotton based system along with its technical package proved to revolutionize cropping techniques, rebuild a new social organization and enhance living conditions, we saw that it also contributed to the acceleration of cropland expansion. Nowadays, land changes having been so rapid, a majority of farmers still practice the same cropping system even if it has become inadequate considering the natural resources scarcity.

To complicate even more the analysis of the drivers of past land change, we should note that behind technological factors, there are also economic and political factors. Indeed, the introduction of new techniques was linked to the promotion of cotton crop by the government, in response to international pressure to improve trade balance. Similarly, the arrival of migrants also hides climatic and geopolitical factors, as most of them came following a drought period in the North of Burkina Faso, and another part returned from Ivory Cost fleeing the civil war. These last points subscribe to a more global vision of land change that involves several types of factors at different scales (Lambin and Meyfroidt, 2011).

Finally, with causes and effects that were more complicated than only a demographic pressure, the last fifteen years have been marked by such an intensification of clearing that very little land remains available. Farmers are now facing the consequences of overexploitation of resources, raising many questions for the future.

2.5.3. What next if nothing changes?

The Malthusian evolution would consider that ongoing processes will lead to the progressive conversion of all available natural lands to cropland. Even though this position is criticized for its pessimism and for not taking into account the capacity of people or governments to innovate or adapt, the simulation nevertheless underlines the emergency to go out from this Malthusian schema as it is estimated that in no more than 15 years 80% of the remaining natural vegetation will be depleted.

One consequence of this Malthusian scenario would certainly be an important emigration towards cities, other regions with available lands, or countries in need of agricultural workforce. Results showed (III.4) that a slow rate of deforestation would be reached if one person out of two emigrates.

An important migratory movement towards more promising areas in reaction to the natural resources depletion would not be a new phenomenon in West Africa. Indeed, West Africa has always known important population movements within its different regions and countries. It is in fact the first hosting region for migrations in Africa (Ndiaye and Robin, 2010). These movements are a permanent population adjustment between areas with different population densities, economic attractiveness and natural resources characteristics. Reasons and shapes of these migratory movements are diverse but are the outcome of strategies that depend on economic opportunities (Bossard, 2003). Emigrations have in common a departure from a zone with difficult livelihood and work conditions towards a zone often presenting important economic potentials (mostly in urban centres) or abundant and sparsely exploited natural resources, with the possibility of being hosted by local populations (Rémy, 1981; Henry et al., 2002). The hypothesis of enhanced emigration is thus in continuity with known dynamics of West Africa. The recent departures from the province of numerous livestock farmers show that this migratory movement has already started (Diallo and Vall, 2010).

The question is now to know if there are still exists hosting areas as described above for future migrants. A study questioning the potential hosting zones for emigrations from West Africa has highlighted a potential zone for agricultural migration located between the South Coast of West Africa (already over populated) and the Sahelian fringe (where is located the Tuy Province) (zone number 2 on fig.14). Characterized by its low population density and its low rate of urbanization, this area presents an important potential for welcoming future migrants from West Africa (WALTPS in Bossard 2003).

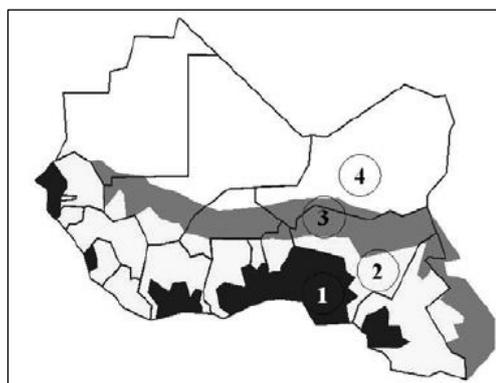


Figure 54: Four populating areas in West Africa. (WALTPS in Bossard 2003).

To avoid this important emigration, the logical reaction to the Malthus scenario is to reduce the population growth, which would slow down cropland expansion. Further policies aiming at reducing the birth rate exist and could be implemented. They concern for example, voluntary family planning, promotion of children education and improvement in women social status (Ezeh, 2012; Bongaarts, 1994). However, simulations demonstrated that such measures alone are not sufficient to suppress the coming trends (cf III.2) and have to be accompanied with other changes.

2.5.4. What conditions for an agrarian transition?

An agrarian transition implies intensification of cropping systems (Boserup, 1965; Jouves, 2006), that could reduce cropland expansion rate of more than half (depending on the surface reduction hypotheses). This intensification can be obtained in several ways (Lambin et Meyfroidt, 2011). The “production-oriented” model already applied in Africa since the 60’s, which consists in using fertilizers, new seeds, irrigation and mechanization, have been shown to be unsuitable for local smallholders systems (Giller et al, 2009; Jouves, 2006). An alternative could be the ecological intensification, which consists in increasing primary productivity while preserving natural resources (Cassman 1999). More recently, several studies have contributed to develop natural means to achieve the ecological intensification (Chevassus-au-Louis and Griffon, 2008), promoting the intensive use of natural mechanisms and allowing for conventional techniques that do not disturb these mechanisms. Examples of practices are crops association, manure production, soil covering, agro-forestry, anti-erosive constructions, and integration of livestock, trees and cropping systems. Before the evolutions described in this paper, production systems were built on practices close to the agro-ecology approach, and based on the association of crops, livestock and trees. An agro-ecology transition would be a modernization of this type of system to increase production in a sustainable way.

The simulations presented (III.2) suggest that an agrarian transition would be efficient to significantly limit natural vegetation if it leads to a decrease in farm surface areas by at least a factor of two. Is agro-ecology capable of such an area reduction? As agro-ecology is a relatively new discipline, few studies (e.g. Coulibaly et al., 2012) exist for the Sudanese regions that are able to assess the agronomic performance of such ecological systems.

While the simplified representation of agro-ecology by reduced cropped surfaces in the model enabled us to assess possible trends, a proper study is now required with a more thorough analysis of the implications of ecological intensification. However, this solution taken in isolation is once again insufficient (cf III.2). The more promising way to counter pending deforestation would be to couple this ecological intensification with the control of population growth (cf III.2).

As the performance of agro-ecological systems remains to be confirmed, the question of the feasibility of such a solution is raised (Erlich and Holdren, 1971). An ecological transition involves deep change in many domains, including the eco-socio system (Caron et al., 2014). Market access and opportunities as well as support policies play an important role in that transition and influence the speed of conversion of farming systems (Milleville et Serpantié, 1994). If agro-ecology recommends production diversification, farmers need access to markets in order to buy seeds and sell their productions. Thus, the agrarian transition has to be accompanied with the improvement of marketing channels (Sumberg 2003). In the case of the

Tuy Province, farming systems are deeply involved in an integrated cotton chain, organized around a semi-private company that promotes surface increases and techniques demanding high inputs. Part of the social system was built around cotton production with several Cotton Producers Groups (GPC) organized in each village to deal with the company. In that context, an agro-ecological transition would require important changes in cropping systems as well as in the organization of society (Tallet, 2007). Even if the cotton sector has experienced a slight loss of impetus during these last few years, a cessation of cotton in the coming years is not likely to occur. Moreover, cotton is a cash crop that generates income only few farmers can do without. An agro-ecological system should therefore replace cotton by a cash crop that could have the same role. The introduction of such a crop would then require a developed market channel. Another restriction may lie in the biological feasibility of this ecological transition. With presently degraded soils and little manure available, farmers cannot suddenly stop all chemical fertilizers, as soil reconstruction will take time. Several authors underlined the fact that the present agriculture in West Africa cannot forgo external inputs of nutrients, even with ecological techniques and mixed farming (Van Keulen and Breman, 1990; McIntire and Pawell, 1995; Turner, 1995).

An agrarian transition not only implies changing production practices but has to be accompanied by the reorganisation of territories and the collective elaboration of rules to manage resources in a sustainable way. Such an initiative has already started since 2005 in Koumbia municipality, in the south of the study area (Vall et al., 2015). Although this work has led to the collective elaboration of rules regulating access to resources, its implementation is taking time and is still pending.

All these points suggest that even if a combination of agrarian transition and demographic regulation seems promising for the long term, the question remains whether an ecological intensification can be accomplished rapidly enough to respond to the pressing deforestation threat while maintaining an acceptable livelihood level.

2.5.5. Uncertainties in prospective scenarios due to model simplification

Although the model is strongly based on literature and field surveys, many choices were made in order to have the fairest but most simplified representation of reality. For instance, we chose not to represent the departure phenomenon revealed in population census data that we consider having a limited impact on cropland expansion, as they mainly concern young people and cannot be linked to farm disappearance. Another phenomenon absent from the model is the demand of cities for timber. The study area is near Bobo-Dioulasso, the second most populous city of Burkina, and probably part of the wood cut is for supplying the city with timber. We consider that this wood traffic is indirectly taken into account in the model; the wood cutting modelled encompasses a major part of these flows.

Another limit due to model simplification lies in the scales of analyses considered in the model. Land changes are often triggered by indirect and distant phenomena, like for instance urban dynamics, variations in international market prices, increased land market activity driven by investors, emerging demand for new products, climate hazards in other countries or investment in the mining sector. Working on prospective scenarios that include such processes is intricate, especially with a regional model of a semi-closed system. When listing the effects of globalization on land change, Lambin and Meyfroidt (2011) described what he calls the

“rebound effect”, the indirect consequences on land changes of the introduction of new technologies. The example of agricultural intensification that can in fact increase crop surfaces was explained by decreasing prices that may cause an increase in demand (in case of demand elasticity), or the substitution of other products (in case of inelastic demand).

2.6. Conclusion

The case study presented contributes to our understanding of drivers of land change in the context of globalization and analyses several actions proposed to lessen the coming trends. If several articles already exist about the crucial question of natural resources depletion due to human activity, the novelty of the presented approach lies in the use of spatial modelling that enables to quantify occurring phenomena and to give possible orders of magnitude for what could potentially happen in the future. It highlights the emergency of the current situation and suggests that although the more pessimistic trends are not ineluctable, deep changes are required at different scales, from the authorities and the population concurrently.

A review of the literature showed that several regions of Burkina Faso and West Africa have known similar trajectories, each with their own characteristics. Examples include the neighbouring region of Haute Volta (Tallet 2007), of Ghana (Amanor and Pabi, 2006) or of Velingara department in Senegal (Wood et al., 2004). Like here, in all these cases, natural resources shortage resulted from a combination of different factors, including an important demographic growth. Nevertheless, Sumberg (2003) argued that the suggested agro-ecology solution is not adaptable everywhere. Only areas that still possess good natural resources and that are located close to urban centres are good candidates for a successful agrarian transition. Even if the case study presented should be compared to zones with similar dynamics, possible solutions have to be evaluated and adapted taking into account specific characteristics of each area. In our case study, the example of the particular cotton production underlines the importance of taking into account the sociological, historical and geo-political specificities of each region in order to bring adequate solutions.

3. Article 3 : Modélisation des processus de décision des assolements : quelle marge de manœuvre pour les agriculteurs du Burkina Faso ?

Jahel C., Augusseau X., Lo Seen D.

3.1. Introduction

En Afrique de l'Ouest, les agriculteurs doivent composer avec les aléas climatiques, économiques et politiques, peu d'accès au crédit, aux marchés et peu de soutien de la part des politiques publiques (Gafsi, 2007). Si à première vue ce manque de moyens et d'opportunités couplé à toutes ces contraintes peut laisser penser que les assolements varient peu d'une année sur l'autre, les statistiques agricoles semblent montrer le contraire. La province du Tuy située à l'ouest du Burkina Faso en est un exemple : au cours de ces 15 dernières années, ses cultures ont connu de grosses fluctuations, le maïs étant par exemple passé de 25% à 40% du total des surfaces en cultures. Ces variations sont surtout visibles d'une année sur l'autre, l'exemple le plus frappant étant la réduction des proportions de coton de moitié, entre 2006 et 2007.

Ces dynamiques d'assolement, visibles à l'échelle régionale, dérivent directement de décisions prises individuellement par les chefs de chaque exploitation agricole. L'objectif de cet article est d'explorer les dynamiques d'assolement à l'échelle de la province du Tuy, via l'analyse des processus de prise de décision des agriculteurs et des facteurs décisionnels impliqués.

Si les exploitations agricoles familiales du Burkina se caractérisent par leur forte diversité, elles ont comme point commun de produire des biens et services dans le but de créer des richesses et subvenir aux besoins de la famille. À ces deux objectifs principaux s'ajoute une panoplie d'autres objectifs plus précis, variant d'une exploitation à l'autre en fonction des motivations, capacités et expériences du chef d'exploitation, du stade du cycle de vie de l'exploitation ou des besoins particuliers de la famille. Il peut s'agir, par exemple, de développer l'exploitation, de préparer celle-ci à la reprise par héritage, etc. (Gafsi et al., 2007). La réalisation de ces objectifs, via la production des biens, passe par la combinaison entre les ressources internes à l'exploitation, qui sont souvent limitées (travail, capital et foncier), et les informations dont les agriculteurs disposent sur les opportunités et contraintes externes.

Au sein d'une année agricole, la gestion d'une exploitation se réalise en trois étapes: prévision, mise en œuvre et contrôle (Gafsi et al., 2007 ; Kay et Edwards, 1999). La prévision consiste à savoir que produire, en quelle quantité et comment, en relation avec les objectifs spécifiques de l'exploitation. La réalisation de ces prévisions demande la mise en œuvre des moyens dont dispose l'exploitation et l'application de décisions opérationnelles. Un contrôle régulier de l'avancée des travaux est effectué de manière à prendre des décisions permettant de réajuster les éventuelles déviations.

Ces trois étapes requièrent à chaque instant une prise de décision face à des faisceaux d'opportunités et contraintes qui se présentent (Brossier et al., 1997 ; Gafsi et al., 2007). Kay et Edwards (1999) décrivent les processus de décision comme un mécanisme permanent qui consiste à faire des choix d'allocation de ressources. Dans le cas des exploitations familiales d'Afrique de l'Ouest qui sont encore majoritairement gérées par de grandes familles, l'identification des centres de décision est souvent compliquée du fait de l'existence d'une gestion collective, en parallèle à une gestion individuelle (champs collectifs, champs des femmes, champs des enfants etc.) (Ancey, 1975), même si les aînés ont souvent une place prépondérante. Pour notre étude nous simplifierons cette complexité de relations en imaginant un unique centre de décision.

Les décisions sont classées en trois types : les décisions stratégiques, les décisions tactiques et les décisions courantes (Gafsi et al., 2007). Les décisions stratégiques concernent les décisions à long terme portant sur les grandes orientations de l'exploitation, comme les investissements en matériel destiné à un usage pluriannuel. Les décisions tactiques établissent les grandes lignes des opérations agricoles au cours d'une saison, ce sont celles qui doivent être prises en phase de prévision. Elles regroupent les choix d'assolement, les décisions techniques, les choix de valorisation des produits etc. Enfin, les stratégies courantes sont menées au jour le jour et consistent à mettre en œuvre et adapter les techniques choisies aux événements et aléas quotidiens.

Dans cet article, nous nous intéressons essentiellement aux décisions tactiques concernant le choix de l'assolement qui est fait en grande partie durant la phase de prévision et qui peut être réajusté durant la phase de contrôle. Kay et Edwards (1999) séparent ce processus en trois étapes, que nous simplifions pour le choix de l'assolement : i) identifier les objectifs à atteindre, ii) récapituler les ressources disponibles, i.e. ressources en travail, en capital et en foncier, ainsi que les déterminants externes et iii) allouer les ressources aux différentes cultures.

De nombreux travaux ont contribué à modéliser ces processus de décision et leurs impacts sur les performances de l'exploitation. Si la majorité concernent les stratégies techniques et le déroulement des opérations agricoles (Dury et al., 2011 ; Aubry et al., 1998a ; Cerf et Sebillotte, 1997 ; Aubry, 2007 ; Dounias et al. 2001 ; Schaller, 2011), seule une petite partie concerne les processus de choix d'assolements et analyse l'impact de facteurs externes sur ces choix (Houet, 2006 ; Deressa et al., 2009 ; Seo et Mendelsohn, 2008). Peu décortiquent les combinaisons de facteurs menant aux choix d'assolements et utilisent les modèles de manière rétrospective pour traiter cette problématique.

Nous retenons néanmoins l'approche communément utilisée pour modéliser les processus de décision, qui consiste à construire des règles de décision en fonction de déterminants. Les déterminants sont les moyens ou informations dont dispose l'exploitant pour faire son choix. Ils peuvent être internes à l'exploitation, comme le nombre d'hectares disponibles ou la main d'œuvre mobilisable ; ou bien externes comme les prix ou le climat. Les règles de décision (Sebillotte and Soler 1990 ; Aubry et al., 1998b ; Merot et al. 2008 ; Schaller 2011) sont les règles élaborées par l'agriculteur lorsqu'il prend une décision. Une règle peut-être par exemple : « si la saison est tardive, les surfaces en coton sont diminuées et celles en sésame augmentées ».

Cette étude reprend cette approche « déterminants/règles de décision » pour évaluer le poids de chacun des facteurs déterminants dans les assolements finaux. Une première partie

présente les données utilisées et la méthode développée. Les résultats liminaires seront ensuite décrits, à savoir l'identification des objectifs, des déterminants et des règles de décision pour les différents types de systèmes de production de la zone d'étude. A partir de ces premiers résultats, un modèle est construit, calibré et validé et permet d'explorer l'impact des différents déterminants sur les assolements. Une dernière partie mettra en perspective cet impact avec la marge de décision dont disposent les agriculteurs, au regard d'une relation contractuelle intégrée avec l'entreprise cotonnière de la zone. Cette dernière partie permettra de commenter l'approche originale, mise en œuvre via une hiérarchisation des objectifs de l'exploitant, ainsi que l'importance de la modélisation quand il s'agit de renforcer les résultats de terrain.

3.2. Matériel et méthode

3.2.1. Données

La zone d'étude est la province du Tuy, de 5600 km², située au centre-ouest du Burkina Faso. Le climat est de type soudanien. La zone est traversée par un massif collinaire ne dépassant pas les 400 m d'altitude, séparant deux grandes plaines aux sols ferrugineux. 20% du territoire est en forêt protégée depuis 1990, le reste étant majoritairement dédié aux cultures, dont les principales sont le coton, le maïs et le sorgho.

Marre-Cast et Vall (2013) ont élaboré une typologie des systèmes de production de la zone, en distinguant les agriculteurs, les agro-éleveurs et les éleveurs.

Deux types de données ont été utilisées : celles qui serviront de données d'entrée dans le modèle et celles qui permettront de calibrer et valider le modèle.

Les données d'entrée du modèle sont l'évolution des prix des principales cultures, la pluviométrie et la texture des sols. Les données pluviométriques sont issues d'une série temporelle TAMSAT de 2000 à 2015, de résolution spatiale de 4 km et ayant été désagrégées pour une résolution temporelle journalière. La texture des sols dérive des cartes des sols réalisées par l'Institut Géographique du Burkina (IGB). Les prix ont été relevés dans les archives papier des Services de l'Agriculture, et concernent la moyenne annuelle des prix payés aux agriculteurs sur la province du Tuy.

Les données utilisées pour calibrer et valider le modèle sont l'évolution des surfaces récoltées de chaque culture issues des enquêtes statistiques d'AGRHYMET de 2001 à 2011. Les données en coton proviennent des données de l'entreprise cotonnière de la zone, la Sofitex. Deux cartographies des cultures ont été réalisées pour 2012 et 2013 sur la commune de Koumbia à partir d'images satellitaires Pleiades.



Figure 55: Evolution des proportions (graphique du haut) et des prix (graphique du bas) des espèces cultivées.

Si les espèces cultivées sont restées les mêmes, leurs proportions ont quant à elles connu d'importantes fluctuations au cours de la période étudiée (fig.55). Ces variations sont surtout marquées pour le coton, le maïs et le sorgho, les espèces secondaires restant plus ou moins stables - entre 2 et 5% du total des surfaces. Alors que les courbes de proportion du maïs connaissent une augmentation relativement progressive, les cultures de coton et de sorgho sont soumises à des fluctuations importantes d'une année à l'autre, l'exemple le plus frappant étant les années 2006-2007.

Les prix des principales espèces ont aussi connu d'importantes variations tout au long de cette période : les prix des trois céréales (maïs, sorgho et mil) ont évolué de manière similaire et relativement stable, (excepté pour l'année 2005 durant laquelle des épisodes de sécheresse ont engendré de très mauvaises récoltes et une hausse des prix).

Le prix du coton connaît des variations limitées, en comparaison aux deux autres cultures de rente que sont le soja et le sésame. Contrairement à ces deux dernières, les prix du coton ne reflètent pas directement les prix des marchés internationaux. Ils sont en effet fixés, chaque année, à l'avance par les trois entreprises cotonnières du pays et dépendent des évolutions des trois années précédentes et des prévisions de l'évolution des marchés. Ce mécanisme permet d'assurer un prix plus ou moins constant d'une année à l'autre.

Il est intéressant de noter que l'évolution des proportions des cultures ne suit pas celle des prix, même si certaines tendances peuvent ponctuellement être comparables (par exemple l'augmentation du prix du coton, en 2011, avec celle des volumes de coton). S'il est acquis que les prix ont une influence non négligeable dans la gestion des assolements (Pierye et al., 2009), il semble que la seule prise en compte de ce facteur ne suffise pas à expliquer les évolutions des proportions des cultures.

3.2.2. La plateforme de modélisation utilisée : Ocelet

L'étude utilise un modèle existant (Jahel et al., 2016), construit sur la plateforme de modélisation Ocelet (Degenne et Lo Seen, 2016). Elle ne reprend et ne développe qu'une partie de ce modèle: les processus de création des assolements. Ocelet est un langage et un environnement de simulation pour modéliser les dynamiques spatiales (Degenne et Lo Seen, 2016). Le langage est basé sur les graphes d'interaction. Ces graphes sont constitués d'entités caractérisées par des propriétés, et liées entre elles par différentes relations. Une fois que les entités et leurs liens ont été décrits, des scénarios sont exécutés et font évoluer les entités en fonction de leurs relations.

Le modèle utilisé dans la présente étude implique deux types d'entités : l'entité « parcelle » et l'entité « exploitation ». Les parcelles dérivent d'une cartographie de la structure du parcellaire en 2000. Elles sont liées aux exploitations auxquelles elles appartiennent, ces dernières étant créées par le modèle selon certains critères issus d'études de terrain. Le scénario consiste à allouer chaque année des espèces cultivées aux parcelles en simulant le processus décisionnel de chaque agriculteur en fonction de plusieurs facteurs déterminants.

3.2.3. Méthode : du terrain au modèle

La méthode se divise en deux temps. Des enquêtes auprès des agriculteurs ont tout d'abord été réalisées dans le but de comprendre leurs stratégies d'assolement et d'identifier les facteurs les influençant. Trois types d'enquêtes ont été réalisés :

- Des entretiens collectifs ont eu lieu dans 18 villages pour rencontrer les chefs du village, les notables et les membres du comité villageois. Ces entretiens, semi-directifs, avaient pour but i) d'identifier les changements de cultures ayant eu lieu durant ces 15 dernières années, ii) d'identifier les facteurs responsables de ces changements.
- Des entretiens individuels ont été menés auprès de 50 chefs d'exploitation dans le but de comprendre le choix des assolements, pour replacer dans l'année les moments clés de prise de décision et identifier le poids des facteurs sur la décision.
- Des entretiens auprès des services d'encadrement agricoles, d'un groupement d'agriculteurs et de l'entreprise cotonnière de la zone ont permis de croiser les informations recueillies avec des visions plus globales des dynamiques de la zone.

Ces entretiens ont permis d'élaborer des règles de décision selon les types d'agriculteurs, de manière semi-qualitative. En effet, les règles suivent les processus de choix des cultures décrits par les agriculteurs, et les seuils de décision sont fixés par analyse statistique des données des exploitations. Par exemple, si l'agriculteur doit choisir ses surfaces en maïs en fonction des personnes à nourrir, ce processus de choix sera traduit en règle, et le rapport « surface maïs/bouches à nourrir » découlera des données d'enquête. L'approche développée dans cet article est de hiérarchiser les objectifs à atteindre pour élaborer les règles de décision et leur donner un ordre de priorité.

Ces règles ont ensuite été traduites dans le modèle, via la relation « champ-exploitation ». Cette relation est divisée en trois interactions, ayant lieu avant chaque saison de culture, et suivant les étapes décrites par Kay et Edwards (1999) :

- i) Récapitulation par chaque exploitation des informations dont elle dispose avant de choisir ses cultures : facteurs externes (prix, liens avec les entreprises, climat...) et facteurs internes (localisation des parcelles, historique des parcelles, différents sols, nombre de travailleurs...). Dans le modèle, les facteurs externes sont renouvelés chaque année et proviennent de données extérieures au modèle, alors que les facteurs internes sont issus des propriétés propres à chaque entité exploitation.
- ii) Choix d'un assolement cultural « idéal » en fonction des facteurs. Contrairement aux autres études qui considèrent les choix d'assolement de manière global en fonction de variables, nous développons dans cette étude une approche basée sur une hiérarchisation des objectifs de l'exploitation. Ainsi l'agriculteur choisit en priorité les cultures destinées à atteindre les objectifs les plus importants, et complète progressivement l'assolement avec les cultures destinées à remplir les objectifs moins prioritaires.
- iii) Allocation des cultures aux parcelles de manière à être le plus proche possible de cet assolement « idéal » mais en respectant les contraintes liées aux propriétés du sol et à la localisation de la parcelle.

Le modèle de décision est calibré à partir des données recueillies entre 2000 et 2006 et validé avec les données de 2007 à 2013. Une validation intermédiaire, dite validation conceptuelle (Rykiel, 1996), a été réalisée pour s'assurer de la cohérence des règles de décision mises dans le modèle : les résultats des enquêtes terrain ont été restitués à une trentaine d'agriculteurs qui ont validé les différentes stratégies proposées pour chaque type d'agriculteur.

Le modèle de décision ainsi validé peut être utilisé pour explorer les différents facteurs et processus de décision guidant les assolements. Chaque champ auquel a été allouée une espèce donnée garde en mémoire les facteurs qui ont été à l'origine de cette allocation, ce qui permet ainsi d'estimer chaque année le poids des facteurs en jeu dans les assolements.

3.3. Résultats liminaires : compréhension des stratégies d'assolement et construction du modèle

Cette partie présente l'identification des objectifs des exploitations de la zone, des différents facteurs de décision et les différentes règles de décision.

3.3.1. Identification des objectifs et impératifs

L'objectif commun à toutes les exploitations est de produire des richesses et de subvenir aux besoins de la famille. A partir de ces deux objectifs principaux, on peut dériver d'autres objectifs secondaires plus détaillés. Les objectifs sont communs à toutes les exploitations, mais leur importance diffère selon les types d'exploitation (Annexe 1). Quatre principaux objectifs ont été identifiés suite aux enquêtes de terrain :

- 1) Apporter les quantités nécessaires de nourriture à la famille ;
- 2) Apporter des aliments diversifiés à la famille ;
- 3) Avoir des entrées d'argent échelonnées permettant de subvenir aux besoins secondaires pour différentes périodes de l'année, notamment ceux intervenant en fin de saison des pluies, lorsque l'argent des principales cultures récoltées n'a pas encore été touché. C'est le cas, par exemple, des dépenses de scolarité devant être faites en septembre, qui ne sont réalisables qu'avec les revenus liés aux cultures précoces.
- 4) Avoir de la liquidité, afin de répartir certains bénéfices entre les membres de la famille pour maintenir la cohésion familiale. La réalisation de cet objectif se fera surtout via les cultures de rente. La liquidité permet aussi de capitaliser dans l'acquisition de bovins ou dans des investissements d'infrastructure.

Ces quatre objectifs peuvent être classés en deux catégories : ceux qui répondent aux besoins primaires de la famille (objectifs 1 et 2) et ceux qui comblent les besoins secondaires (objectifs 3 et 4).

3.3.2. Identification des déterminants influençant le choix d'assolement

Au terme des entretiens, 8 déterminants principaux ont été identifiés par les agriculteurs, se partageant entre facteurs internes et externes à l'entreprise (tab 9).

Table 9: Récapitulatif des différents facteurs déterminants.

Facteurs internes	Le nombre de travailleurs (déterminant 1) L'équipement (déterminant 2) Le capital (déterminant 3) Le foncier (déterminant 4)
Facteurs externes	Le climat (déterminant 5) Les prix des cultures de rente (déterminant 6) Les mesures incitatives et processus de diffusion (déterminant 7) Les crédits sur les intrants (déterminant 8)

Les facteurs internes sont le nombre de travailleurs mobilisables, l'équipement, le capital, le foncier (surface des parcelles et texture du sol). Selon la typologie préétablie par Marre-Cast et Vall (2013), les facteurs internes sont déjà connus pour chaque type d'exploitation. Ils concernent la structure de l'exploitation (foncier, capital, équipement et nombre de travailleurs).

Les quatre facteurs externes identifiés sont spécifiques à la zone d'étude et requièrent une description plus détaillée. Ce sont les conditions climatiques, les prix des cultures de rente, les mesures incitatives amplifiées par le processus de diffusion et les modalités d'accès aux intrants à crédit.

- **Le climat :** Lors des entretiens collectifs, l'un des premiers facteurs de changement cité par les agriculteurs a été « les pluies », notamment les débuts de saison tardifs, les événements de sécheresse ou les inondations. La date de début des premières pluies est déterminante dans le choix de l'assolement, une saison tardive conduira à favoriser les espèces de cycle court ou celles semées tard (comme le sésame). La variété de coton majoritairement cultivée est de cycle long, les agriculteurs auront tendance à le remplacer par du maïs à cycle court pour une saison tardive (bien que l'entreprise fournisse une variété de coton tardive, mais moins performante).
- **Les prix des cultures de rente :** La grande majorité des agriculteurs interrogés a affirmé ne prendre en compte que le prix des cultures de rente, à savoir le coton et le sésame. Pour le coton, les prix sont annoncés avant la saison, de manière à ce que l'agriculteur puisse choisir les surfaces à emblaver sans trop d'incertitude. La filière sésame est moins structurée dans la zone, les prix sont directement ceux du marché international. Si des acteurs, porteurs de « projets », peuvent parfois s'engager à acheter les récoltes, les prix ne sont pas régulés comme pour le coton, et la seule information dont dispose l'agriculteur avant la saison est la référence au prix des années précédentes. Pour pouvoir simplifier le choix des surfaces attribuées aux cultures de rente en fonction de leurs prix respectifs, nous avons normalisé les prix pour obtenir un ratio compris entre 0 et 1. 1 signifie que le prix est le plus élevé de la période, 0,5 signifie que le prix a atteint sa valeur moyenne sur la période et 0 qu'il est au plus bas. Cela permet de ne pas considérer un prix en valeur absolue, mais de le replacer sur une échelle de valeurs. Pour le coton, l'agriculteur se base sur le prix annoncé pour la saison en cours alors qu'il regarde le prix de l'année précédente pour le sésame, en l'absence de prix annoncés.
- **Les stratégies de fidélisation des entreprises ou des « projets » :** Nous divisons cette section en deux sous catégories : i) les mesures incitatives, et ii) les crédits sur les intrants pour le coton. Les crédits sur les intrants pourraient être inclus dans la catégorie « campagnes de promotion », mais nous avons préféré les traiter à part au vu de leur importance dans les choix d'assolement.
 - i) **Les mesures incitatives :** Elles concernent les stratégies de l'entreprise pour augmenter les surfaces emblavées par les agriculteurs avec la culture de rente ciblée. Plusieurs stratégies sont ainsi développées comme les promesses d'achat, la facilitation de l'accès aux semences, l'encadrement et la promotion sur le terrain. Les promesses d'achat et la facilitation d'accès aux semences proviennent souvent des « projets » qui consistent en une distribution des semences en

début de saison, avec engagement de revenir acheter les récoltes en fin de saison. Ces dernières années ont vu augmenter le nombre de ces projets pour le sésame et le soja. L'entreprise cotonnière développe la même stratégie en vendant les semences à crédit et en s'engageant à acheter les récoltes.

Les campagnes de promotion concernent la présence de l'entreprise sur le terrain pour promouvoir le coton, l'envoi d'agents pour l'encadrement, les mesures de communication, etc.

Pour le coton, les campagnes de promotion pour la période étudiée ont été très liées aux conditions d'évolution de l'entreprise cotonnière. Ainsi, les dates marquantes indiquent une forte campagne de promotion entre les années 2003 et 2006, suite à l'entrée de l'« Union des Producteurs de Coton » dans le capital de l'entreprise en 2000 et à la division de la « Société des fibres et textiles » en trois firmes, conduisant à la libéralisation de la filière.

À partir de 2006, la compagnie traverse une crise interne, liée à la chute du cours du coton sur les marchés internationaux. S'ensuivent des problèmes de trésorerie, des retards de paiement et une diminution de l'encadrement agricole.

En 2008, l'introduction d'une variété génétiquement modifiée, le coton bt, permet un nouvel essor de l'entreprise, en promettant des diminutions des doses d'intrants associées.

À partir de l'année 2011, l'entreprise met en place de nouvelles stratégies attractives, comme une nouvelle politique de paiements plus rapides, l'accès au crédit pour l'achat de tracteurs via l'« Union des Producteurs de Coton » et la mise en place d'une ristourne.

Le succès des campagnes de promotion est souvent amplifié par un phénomène de diffusion. Si la promotion est faite verticalement (de l'entreprise vers une partie des producteurs), l'information circule ensuite horizontalement entre les producteurs, les innovations à succès étant ainsi relayées par les liens sociaux. Pour matérialiser ce processus de diffusion, nous introduisons un indice de diffusion compris entre 0 et 1. Il est de 0 lorsque l'année précédente n'a pas connu de promotion, et augmente de 0.2 si une promotion a été faite l'année précédente et est toujours en cours. Par exemple, pour 4 années consécutives avec une campagne de promotion ayant eu lieu les années 2, 3 et 4, les indices des années respectives seront de 0.0 - 0.0 - 0.20 - 0.40.

- ii) Les crédits sur les intrants**, relation contractuelle entre l'entreprise cotonnière et les groupements de producteurs de coton : chaque année, l'entreprise cotonnière de la zone passe un contrat avec les groupements d'agriculteurs pour les encourager à faire du coton : elle fournit à crédit les engrais pour cultiver le coton et pour une partie du maïs (pour trois hectares de coton, l'agriculteur peut toucher à crédit les engrais pour un hectare de maïs). Pour avoir accès à ce contrat, l'agriculteur doit cultiver plus de 3 hectares de coton et appartenir à un groupement de producteurs de coton. Le groupement sert de caution solidaire en cas d'impayé.

3.3.3. Règles de décision

Nous répartissons les règles de décision suivant deux étapes : la première consiste à choisir les proportions de chaque culture dans l'assolement en fonction des objectifs et déterminants identifiés plus haut. La seconde consiste à répartir spatialement ces assolements en allouant les cultures aux parcelles et en tenant compte de règles biologiques s'appliquant pour chaque culture (texture du sol nécessaire, antécédents cultureaux, temps de repos de la jachère, etc.).

a. Choix de l'assolement culturel en fonction des objectifs et déterminants

Lors des entretiens, nous avons constaté que les règles de décision énoncées par les agriculteurs pour le choix des proportions des cultures étaient hiérarchisées en fonction de l'importance des objectifs auxquels elles répondent, à savoir ceux qui concernent les besoins primaires de la famille et ceux qui comblent les besoins secondaires (cf 3.1). Ce choix se fait donc en deux étapes chronologiques. La première i) concerne les proportions en cultures obligatoires pour subvenir aux besoins de la famille en quantité et en qualité (diversification des aliments). Une fois que les surfaces allouées à ces besoins de base sont atteintes, la deuxième étape ii) consiste à pourvoir les surfaces qui restent (s'il en reste) en choisissant des cultures en fonction des opportunités externes, dans le but d'atteindre les objectifs 3 et 4, à savoir : étaler les entrées d'argent et obtenir des liquidités (fig. 56).

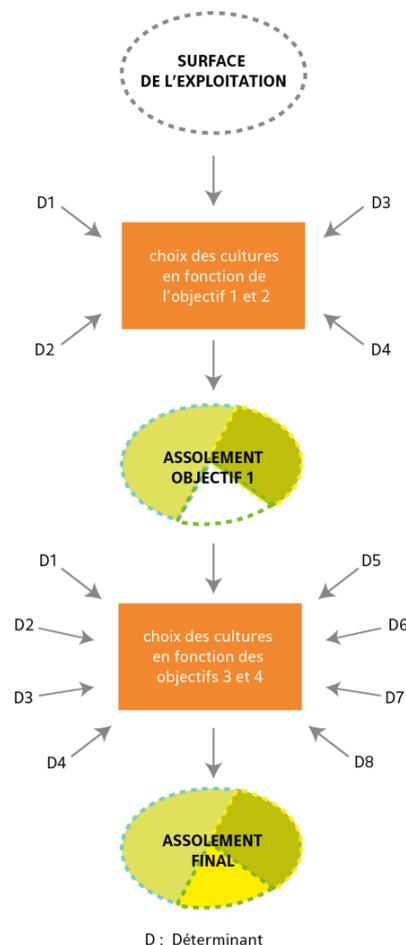


Figure 56: Processus de décision en fonction des objectifs.

- i) Assolement de base en vue d'atteindre les objectifs indispensables à la sécurité alimentaire de la famille

Les règles suivantes tiennent très peu compte des déterminants externes. Elles concernent les cultures indispensables à la survie de la famille et donc sont réalisées quels que soit le contexte externe. Les déterminants pris en compte, internes à l'exploitation, vont conditionner les capacités de mise en culture ; ils sont donc liés au type de système de production.

- Règles de décision pour atteindre l'objectif 1, apporter les quantités de nourriture nécessaires à la famille :

Plusieurs espèces sont cultivées dans le but de subvenir aux besoins alimentaires de la famille. Il s'agit en général surtout de maïs, dont les proportions dépassent largement celles des autres céréales. Une petite surface est néanmoins souvent réservée au sorgho et parfois au mil, moins exigeants en intrants et qui permettent de diversifier les apports alimentaires. Les légumineuses comme l'arachide et le niébé sont cultivées en minorité, souvent sur les parcelles gérées par les femmes, apportant elles aussi un complément alimentaire. Les surfaces en céréales sont le plus souvent directement liées au nombre de personnes à nourrir (Youl et al., 2003). La grande majorité des exploitations de la zone cultive du coton. La première raison avancée par les agriculteurs est liée au contrat passé avec l'entreprise cotonnière et qui assure un accès au crédit (**déterminant 8**). Si le coton ne répond pas directement aux besoins de la famille en nourriture, il est néanmoins compté comme culture pouvant répondre aux objectifs primaires puisqu'il est nécessaire à la culture du maïs.

- Règles de décision pour atteindre l'objectif 2, apporter des aliments diversifiés à la famille et sécuriser les productions d'aliments :

Presque toutes les exploitations interrogées avaient 4 cultures ou plus dans leur assolement, dont au moins deux céréales. Ces processus de diversification sont très étudiés comme stratégie de diminution du risque, de variations d'apports alimentaires et d'organisation du calendrier de travail (Milleville, 1989). Cette diversification se fait en semant de l'arachide, du niébé, du mil et du sorgho.

Les règles de décision (notées *R1*, *R2*, etc.) pour les objectifs 1 et 2 sont donc les suivantes, les proportions pour chacune des espèces cultivées ont été fixées en fonction des assolements observés lors des enquêtes, et ajustées de manière empirique :

R1 : *Choix des surfaces en maïs : entre 10% et 20% de la surface totale. Si le système de production est de type agro-éleveur 2, les proportions de coton sont au double de celles de maïs. Pour les autres types d'exploitations, la surface en coton est comprise entre 0 et 2 fois la surface en maïs.*

R2 : *L'exploitation a 50% de probabilités d'allouer entre 0 et 30% de ses surfaces à l'arachide. Quand ce n'est pas le cas, elle dédie entre 0 et 20% de ses surfaces au niébé.*

R3 : *L'exploitation a 50% de probabilités d'allouer entre 0 et 30% de ses surfaces au sorgho ou au mil.*

À la fin de ce premier assolement, il reste en général une partie des surfaces non attribuées. L'agriculteur choisit les cultures complémentaires dans un second temps.

- ii) Cultures complémentaires pour atteindre les objectifs secondaires : combler les besoins secondaires de la famille et assurer la pérennisation de l'exploitation

- Règles de décision pour atteindre l'objectif 3, étaler les entrées d'argent :

Cet objectif est atteint en même temps que l'objectif 2 de diversification des aliments. En effet, l'étalement des entrées d'argent est réalisé en récoltant et en vendant à des périodes différentes. Les cultures qui permettent d'obtenir de l'argent rapidement, notamment pour subvenir aux frais de scolarité, sont l'arachide, le niébé et certaines variétés de sorgho. Les règles sont donc les mêmes que celles de l'objectif 2.

- Règles de décision pour atteindre l'objectif 4, obtention de liquidités :

L'obtention de liquidités est majoritairement permise via les cultures de rente, dont les deux principales sont le sésame et le coton. Le choix des surfaces à emblaver pour chacune des cultures va être lié aux prix, aux campagnes de promotion, aux promesses d'achat, à l'accès aux semences pour le sésame (**déterminants 6,7, 8**). Un seuil S est calculé pour l'élaboration des règles, en cumulant le prix du coton normalisé et l'indice de diffusion pour une année n . Il permet d'ajuster les surfaces en fonction du prix et du processus de diffusion. Une augmentation en coton va souvent être accompagnée d'une augmentation en maïs pour pouvoir respecter les besoins de rotation.

Les règles de décision en fonction de ces déterminants sont les suivantes pour une année donnée:

R4 : *Si l'entreprise cotonnière fait la promotion du coton et qu'un projet assure la promotion du sésame, alors les surfaces restantes auront 50% de probabilités d'être allouées à l'une ou l'autre des deux cultures.*

R5 : *Si l'entreprise cotonnière fait la promotion du coton et qu'il n'y a pas de projet promouvant le sésame, alors :*

- *les agro-éleveurs alloueront toutes les surfaces restantes au coton*
- *Les autres types de systèmes de production choisiront leurs surfaces en fonction du seuil dérivé du prix et de la diffusion. Le seuil détermine la probabilité qu'ils auront d'emblaver la moitié des surfaces restantes en coton et de partager le reste entre sorgho et maïs (probabilité = S) ; ou de ne pas faire de coton quoi qu'il arrive (probabilité = $1 - S$).*

R6 : *Si l'entreprise cotonnière ne fait pas la promotion du coton et qu'il y a des projets promouvant le sésame, alors :*

- *si le prix normalisé du coton est supérieur à 0.5, l'agriculteur mettra du sésame sur les surfaces restantes dans 15% des cas, du coton dans 45% des cas et du maïs dans 30%.*
- *si le prix normalisé du coton est inférieur à 0.5, le prix normalisé de sésame détermine la probabilité que l'agriculteur aura d'emblaver les surfaces restantes en maïs, en sorgho ou en sésame.*

R7: *Si l'entreprise cotonnière ne fait pas la promotion du coton et qu'il n'y a pas de projets de promotion du sésame, alors, le prix normalisé du coton détermine la probabilité que l'agriculteur a d'emblaver les surfaces restantes en coton, maïs ou sorgho.*

b. Allocation des différentes cultures aux parcelles et mise au repos des terres

Les entretiens ont fait apparaître trois contraintes biologiques majeures : la nécessité de rotations, la nécessité d'un temps de jachère et la prise en compte de la texture du sol. Concernant les jachères, les proportions sont comprises entre 0 et 20% et varient selon les types de systèmes de production (**R8**). Les rotations sont faites en priorité entre coton et maïs, puis entre toutes les autres cultures. Si certaines parcelles ne peuvent être en rotation, il est néanmoins possible de mettre une culture sur la même parcelle plusieurs fois d'affilée (**R9**). Enfin, le paramètre textural concerne surtout la culture d'arachide, qui ne peut être fait que sur des sols sableux ou gravillonnaires - un sol argileux ou limoneux empêche d'extraire facilement la capsule durant la récolte (**R10**). (Annexe 1.2.)

c. Réajustement des assolements en fonction du climat

Le seuil fixé pour évaluer un début tardif de saison des pluies se base sur la pluviométrie de 2015 et a été évalué empiriquement à moins de 70 mm de pluie cumulés atteints au 13 juin. La règle de décision est la suivante :

R11 : *Si la saison est tardive, pour chacune de ses parcelles en coton, l'agriculteur aura 33% de probabilités de remplacer le coton par du maïs, 33% de probabilités de laisser la parcelle en coton et 33% de probabilités de remplacer le coton par du sésame.*

3.3.4. Des règles différentes selon les types d'exploitations

Le processus de décision présenté ci-dessus est le processus général pour toutes les exploitations. Mais les différents systèmes de production ne disposant ni du même capital, du même matériel, ni des mêmes objectifs, des variations dans les proportions entre les espèces cultivées s'observent entre les types d'exploitations.

Ces différences vont surtout se jouer sur la partie complémentaire des assolements, la partie « des besoins primaires » étant globalement commune à tous. La seule différence visible dans la partie « des besoins primaires » concerne les éleveurs, qui possédant beaucoup de fumier sont moins demandeurs de surfaces en coton, en échange de crédit sur les engrais, que les autres.

Les deux autres différences les plus importantes entre les types d'exploitations vont se faire au niveau de l'assolement complémentaire et de la proportion des jachères. Les grands agro-éleveurs auront en effet tendance à allouer toutes les surfaces restantes au coton si les prix sont bons, alors que les autres types d'exploitants vont quand même veiller à diversifier avec du maïs, sésame ou sorgho. Concernant le temps de jachère, il varie en fonction des types d'agriculteurs : les agro-éleveurs et les éleveurs peuvent en général compenser la perte de fertilité par l'apport d'engrais minéraux et organiques, alors que les agriculteurs manquent souvent d'intrants et ne peuvent parfois emblaver toutes leurs surfaces du fait d'une main d'œuvre limitée.

3.4. Résultats de la modélisation : poids des facteurs dans les assolements

3.4.1. Structure du modèle

a. Création des exploitations sur toute la zone

C'est l'étape initiale du modèle, à partir de la carte du parcellaire de l'année 2000 (Jahel et al., 2016). Les exploitations sont créées et reliées aux parcelles. Les exploitations sont de différents types, les proportions entre chacun des types sont basées sur les résultats de Marre-Cast et Vall (2013). Le lien entre exploitation et parcelle est fait en fonction du type d'exploitation. (Jahel et al., 2016). A la fin de l'année 2000, les champs sont liés aux 7000 exploitations de la zone.

b. Boucle annuelle : choix des assolements et allocation aux parcelles

Les règles mises en évidence par les enquêtes ont été traduites dans le modèle selon les algorithmes décrits précédemment, via quatre interactions, s'appliquant chaque année à chacune des exploitations de la zone : le récapitulatif des informations, le choix des assolements, l'allocation aux parcelles et le réajustement éventuel en fonction des données climatiques. La figure 57 présente la structure du modèle et les règles mises en œuvre.

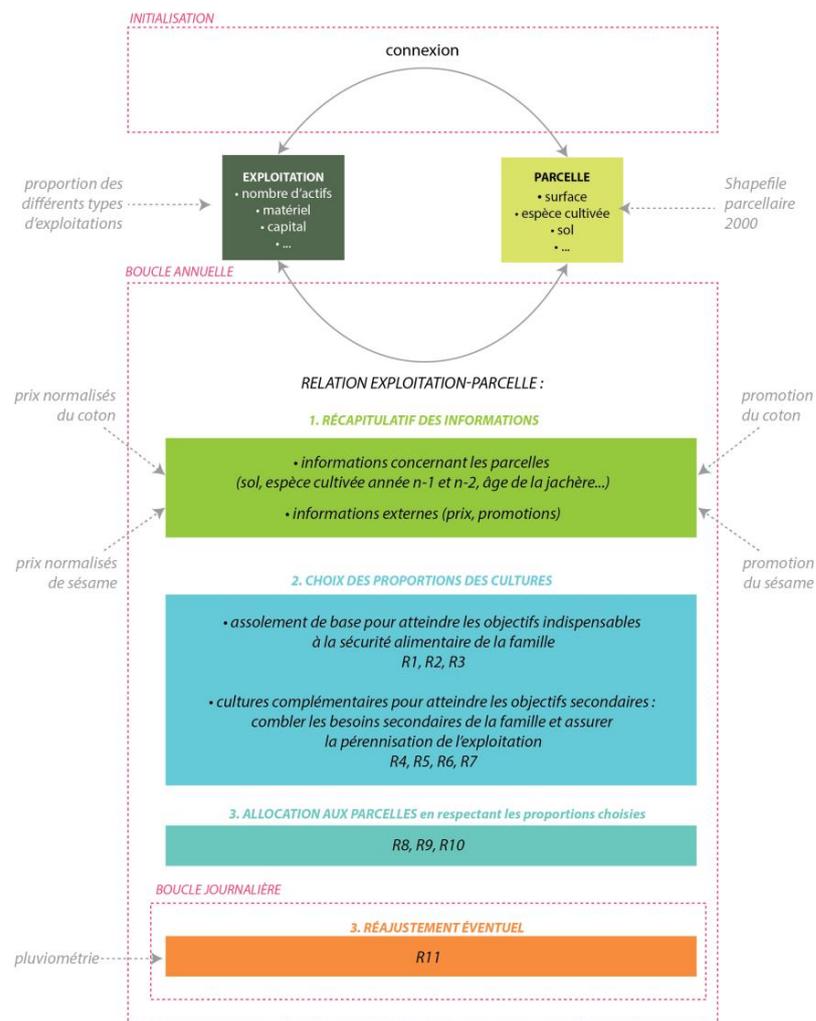


Figure 57: Structure du modèle.

3.4.2. Calibration et validation du modèle

Les seuils ont été réajustés en fonction des données de proportions pour les principales cultures entre 2001 et 2006. Une très faible calibration a dû être réalisée, les tendances étant à l'origine déjà proches des données AGRHYMET. La comparaison avec les données de 2006 à 2011 sert de validation (figure 58). Sur cette période, les proportions simulées des cultures sont proches de celles des données de l'AGRHYMET, avec une erreur moyenne de 2% et une erreur maximale de 10%.

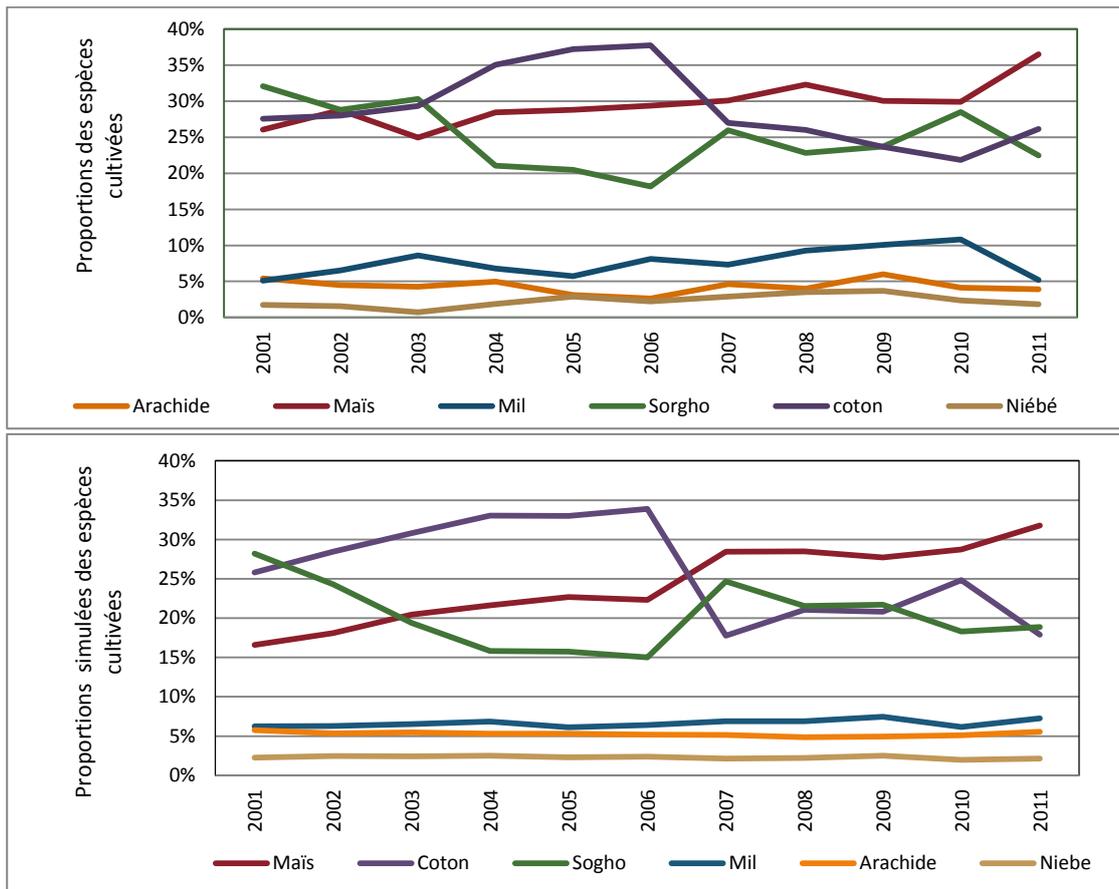


Figure 58: Comparaison des proportions simulées avec celles issues des statistiques agricoles (AGRHYMET)

Une validation supplémentaire a été effectuée à partir des données satellitaires. Seuls des regroupements de cultures par classe sont visibles sur les images (tab. 10) mais permettent néanmoins de s'assurer que les proportions sont bonnes. Contrairement aux données AGRHYMET, elles contiennent aussi les valeurs pour le sésame et la jachère, ce qui permet de voir que (sans avoir été calibré auparavant pour ces cultures) le modèle est capable de reproduire des ordres de grandeurs proches de ceux observés sur les images pour l'année 2013. Pour l'année 2012, le modèle sous-estime de 20% les proportions en coton et surestime de 15% celles en arachide, sésame et niébé. Cette erreur est possiblement due au fait que, si les enquêtes ont souligné l'arrivée de plusieurs projets de sésame en 2011 et 2012, la campagne de

promotion a certainement eu des effets moins importants que ceux modélisés, 2012 étant une année test pour les agriculteurs.

Table 10: Comparaison des proportions des espèces cultivées issues des images satellitaires et du modèle.

	Année	Arachide/sesame/niebe	coton	mais_sorgho_mil	jachere
images	2012	4%	56%	35%	5%
	2013	19%	18%	58%	6%
modèle	2012	19%	36%	40%	5%
	2013	21%	16%	58%	5%

3.4.3. Analyse du poids des facteurs déterminants et des objectifs

a. Evaluation du poids des objectifs et des facteurs déterminants, toutes cultures confondues

Dans cette partie, nous analysons le poids des différents déterminants et objectifs dans les assolements finaux. Pour faciliter l'analyse, chaque déterminant est replacé par rapport à l'objectif auquel il participe. Nous avons vu précédemment que les céréales et légumineuses étaient choisies en fonction de facteurs déterminants internes à l'exploitation, qui n'apparaissent pas dans l'analyse.

Le tableau du poids des objectifs et déterminants (tab. 11) indique qu'entre 2000 et 2014, 55 % des assolements répondent aux besoins primaires incontournables, et 45% concernent les objectifs secondaires. Dans la partie des assolements destinés à combler les besoins secondaires, seulement un tiers découle de déterminants attractifs liés aux cultures de rente (prix, promotion et diffusion). Ils sont essentiellement liés à la culture du coton. Le reste est constitué de céréales (maïs ou sorgho) ne reflétant aucun déterminant externe particulier. D'après le modèle, les pluies tardives n'ont presque pas joué dans le choix des assolements.

Table 11: Poids des facteurs déterminants dans les choix des assolements pour toute la période étudiée.

Besoins primaires - Déterminants internes (Céréales et légumineuses)	45%
Besoins primaires - Crédits	10%
Besoins secondaires - Promotion coton	4%
Besoins secondaires - Promotion coton et diffusion coton	5%
Besoins secondaires - Prix coton	2%
Besoins secondaires - Promotion sésame et prix sésame	4%
Besoins secondaires - Promotion sésame	1%
Besoins secondaires - Déterminants internes (Céréales)	30%

Concernant la répartition de ces facteurs et objectifs dans le temps (fig. 59), les déterminants corrélés aux objectifs primaires (déterminants internes et crédit sur les intrants) ont un poids relativement constant durant toute la période, contrairement aux déterminants impliqués dans les objectifs secondaires. Cela explique la stabilité dans les proportions observées pour les

cultures d'espèces minoritaires comme le niébé, l'arachide et le riz. Un autre fait marquant est l'évolution des types de déterminants : alors que la promotion et diffusion du coton a eu beaucoup d'impact entre 2000 et 2006, d'autres déterminants ont pris du poids à partir de 2007. C'est le cas des prix du coton et du sésame - indépendamment des campagnes de promotion - qui n'entraient pas en compte auparavant (ou n'étaient pas assez élevés pour engendrer un changement d'assolements).

Deux années 2007 et 2012 se distinguent : 2007 est marquée par une absence de facteurs déterminants autres que les crédits pour les intrants. Les objectifs secondaires sont donc comblés avec des céréales (ne dépendant que de facteurs internes). Au contraire, en 2012, tous les besoins secondaires ont mis en jeu des déterminants liés aux cultures de rente. La comparaison de ces deux années confirme le fait que les céréales viennent combler les assolements lorsqu'il n'y a aucune opportunité externe.

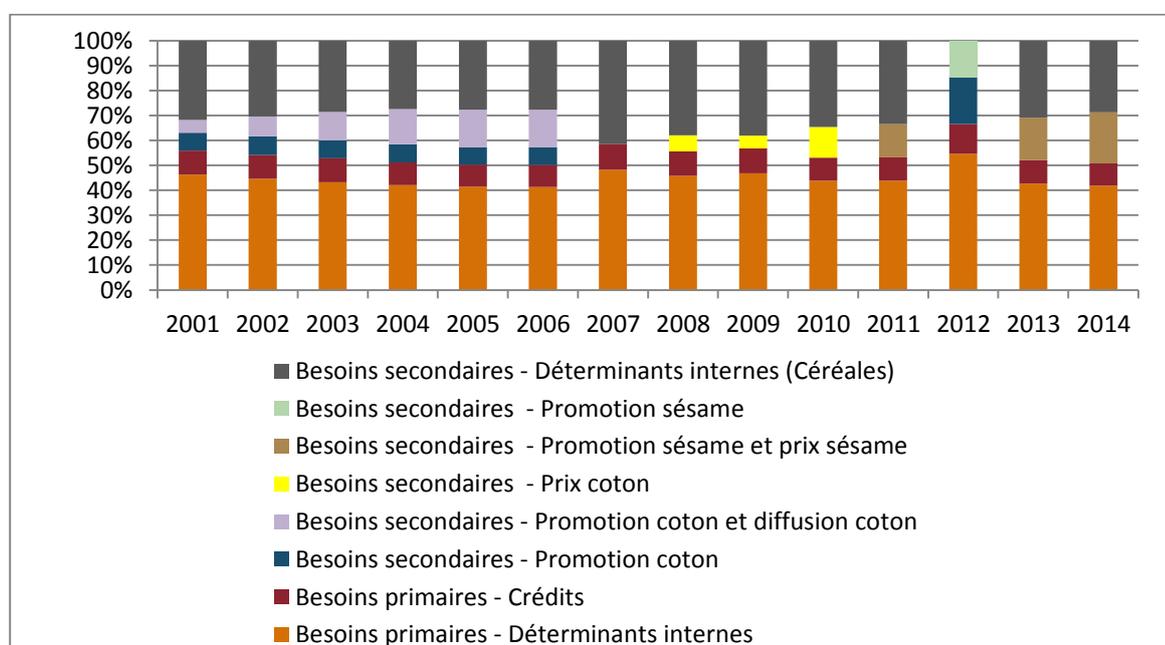


Figure 59: Evolution du poids des différents facteurs déterminants.

b. Cas particulier du coton et du maïs

Pour le coton et le maïs, les deux espèces principalement cultivées, l'objectif « subvenir aux besoins primaires » correspond à une surface constante tout au long de la période. En revanche, le poids qu'il représente par rapport à la surface totale de chacune des espèces varie. En moyenne, la proportion des surfaces en coton destinée à combler les besoins primaires de la famille est supérieure à celle du maïs (fig. 60 et 61).

Ainsi, en moyenne 58% des surfaces en coton répondent aux besoins primaires, pouvant aller de 30 à 100 % selon les années. Le reste est lié aux efforts d'encadrement et au processus de diffusion d'une part, et d'autre part à l'attractivité des prix. Les années où les prix ne sont pas

attractifs et où l'entreprise cotonnière est peu présente, les surfaces en coton se restreignent aux seuils de besoins primaires.

Dans le cas du maïs, au contraire, seulement 39% en moyenne des surfaces sont cultivées pour répondre aux besoins primaires, ce pourcentage variant entre 20 et 60% (mis à part l'année 2012 où la totalité du maïs était cultivée pour cet objectif). Le reste constitue les assolements répondants aux objectifs des besoins secondaires.

Le maïs étant central pour l'alimentation, ce score le concernant s'explique aisément. Mais la présence du coton, culture de rente dans les assolements répondant aux objectifs primaires est moins évidente pour ce qui concerne sa contribution aux besoins primaires de la famille. Cette présence est due au fait que la culture du coton est une condition sine qua non à l'accès aux intrants pour le maïs à crédit.

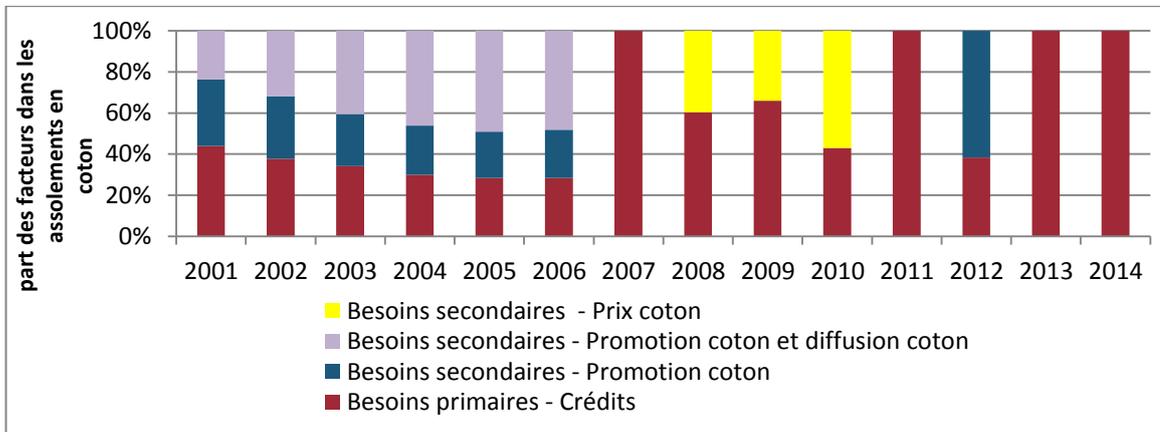


Figure 60: Evolution du poids des objectifs et déterminants ayant joué pour la surface du coton dans les assolements.

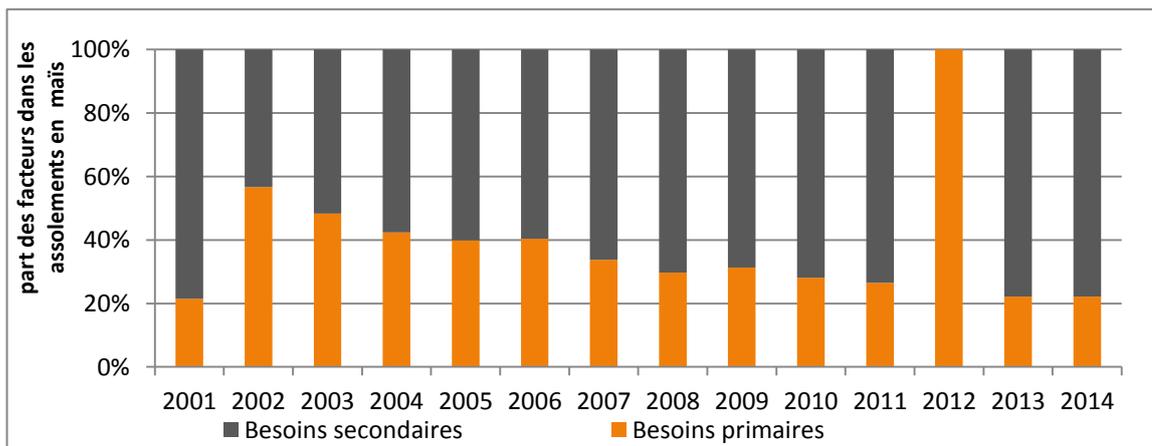


Figure 61: Evolution du poids des objectifs ayant joué pour la surface des céréales dans les assolements.

3.5. Discussion

3.5.1. Limites de l'étude de terrain

L'une des limites de l'étude réalisée réside dans la difficulté à identifier, à partir d'enquêtes, tous les moteurs de dynamiques complexes observées sur le terrain. Si l'étude a tenté d'être exhaustive quant aux facteurs déterminants des choix d'assolement, il a été difficile - lors des enquêtes - de cerner et représenter certains facteurs très spécifiques, notamment pour ce qui concerne les déterminants sociaux.

Un exemple est la pression sociale entourant la culture du coton, qui vient s'ajouter aux autres facteurs déterminant le choix du cotonnier.

En effet, il semble que la société soit véritablement construite autour de la culture du coton, cette pratique devenant un facteur identitaire, totalement ancrée dans l'organisation des villages. Très tôt, la filière coton s'est organisée autour de groupements villageois puis plus tard de groupements de producteurs de coton (Schwartz, 1997; Taller, 2007). Ces groupements permettent un système de caution solidaire entre les agriculteurs pour traiter avec l'entreprise et sont rapidement devenus structurants dans la société.

La pression sociale a été évoquée trois fois durant les enquêtes, tel cotonculteur nous expliquant que si tous ses voisins faisaient du coton il fallait qu'il fasse le même choix sous peine d'être marginalisé. Deux autres agriculteurs ayant récemment décidé d'arrêter le coton, ont témoigné de leur mise au ban de la société, n'étant plus conviés aux réunions. Il a été impossible de faire apparaître ces facteurs dans le modèle, du fait de la difficulté de les replacer dans les processus de décision.

3.5.2. La modélisation comme appui aux analyses de terrain

Les entretiens semi-ouverts sont des outils précieux pour identifier les processus de décision des acteurs du terrain, mais ils présentent l'inconvénient d'être parfois subjectifs, et leur nombre limité pose la question de leur représentativité pour couvrir toute la province du Tuy. La traduction en modèle des dynamiques de terrain observées et l'obtention de simulations proches de la réalité après une calibration très limitée, renforce la crédibilité accordée aux analyses issues des enquêtes de terrain. L'approche développée, basée sur la hiérarchisation des règles de décision par «objectifs», est elle aussi partiellement validée par les résultats de la modélisation. Ce lien entre typologies issues d'études de terrain et modélisation ouvre des perspectives importantes, notamment pour la spatialisation des typologies et leur validation à l'échelle régionale. L'étude réalisée a montré que les typologies élaborées lors de précédents travaux (Marre-Cast et Vall, 2013) sont bien représentatives des dynamiques du terrain et sont applicables sur toute la province.

D'autre part, si les études terrain permettent d'identifier les processus et facteurs à l'origine des dynamiques observées, la quantification de leurs poids respectifs est plus ardue. L'étude réalisée a montré que le modèle, une fois calibré et validé, permettait de dénouer les combinaisons entre facteurs et de réaliser une telle quantification.

Néanmoins, un des reproches qui peuvent être faits au modèle réside dans la simplification de la réalité observée. En effet, plusieurs déterminants décisionnels identifiés sur le terrain ont

été simplifiés, comme les techniques de cultures adoptées, le matériel à disposition, les rendements obtenus, les revenus de l'agriculteur ou encore les activités et revenus externes à l'exploitation, qui sont pourtant déterminants dans les orientations prises par l'exploitation.

La simplification a été réalisée via le recours aux types d'exploitations, chaque type étant caractérisé par une fourchette de déterminants structurants. Par exemple, nous avons considéré en nous basant sur les enquêtes et la littérature que les exploitations de type agro-éleveur possèdent un équipement performant et assez de capital pour payer de la main d'œuvre supplémentaire ainsi que les intrants. Ils ne sont donc pas considérés comme limités dans leur capacité à emblaver toutes leurs surfaces. Au contraire, certains agriculteurs ne disposent pas des moyens suffisants pour cultiver toutes leurs terres, ce qui les amène à en laisser une partie au repos. La relation de cause à effet a donc été simplifiée en associant les choix d'assolement à des types d'agriculteurs et non pas directement aux facteurs impliqués (revenu, matériel ...).

Ce type de généralisation peut rapidement mener à des approximations risquant de biaiser les résultats du modèle. L'un des moyens mis en œuvre pour compenser cet effet est le recours aux probabilités. En effet, traduire les règles observées sous forme de probabilités permet de simuler toute la diversité de situations existantes. Cela permet aussi de représenter la diversité intrinsèque à un même type de système de production. En effet, tout choix n'est pas fait avec une seule logique mécanique d'optimisation économique, mais dépend aussi de la personnalité de celui qui le prend, de ses contraintes et opportunités propres, des aléas externes individuels (mariage, enterrement, réseau social, etc.).

3.5.3. Quels choix ont les agriculteurs pour constituer leurs assolements ?

L'autre conclusion que l'on peut tirer de cette facilité à reproduire les dynamiques de choix des cultures en modèle, sans avoir recours à un important travail de calibration tient au fait que la réalité à modéliser est au fond assez simple : les agriculteurs de la province du Tuy ont peu de marge de manœuvre et d'opportunités. Les choix d'assolement sont faits sous contrainte, et le nombre élevé de ces contraintes est responsable du fait qu'il n'existe pas beaucoup de combinaisons possibles de cultures.

Le parti pris de hiérarchisation des règles de décision par objectif permet d'estimer que plus de la moitié des assolements est constitué dans le but de combler les besoins primaires de sécurité alimentaire de la famille, et seuls 45% viennent répondre aux besoins secondaires, i.e. l'éducation, la santé ou la pérennisation de l'exploitation. Si l'on prend un revenu moyen par tête de 69 000 FCFA (FAO, 2013), soit un revenu de 690 000 FCFA dégagé par les systèmes de production de la zone (en considérant une moyenne de 15 personnes par exploitation), et que l'on considère - en comptant large - que la moitié des besoins secondaires est réinjectée dans l'exploitation, il reste une moyenne de 155 000 FCFA (soit 354 euros) pour faire fonctionner l'exploitation l'année suivante (achats d'intrants, de matériel, d'infrastructure...). Dans de telles conditions où la majorité des récoltes de chaque année est destinée à la survie de la famille, il est très difficile pour les agriculteurs de réussir à capitaliser, et la spirale de pauvreté est maintenue.

Pour nuancer ce raisonnement, notons néanmoins que seuls les systèmes de culture ont été pris en compte dans l'étude. Pour un nombre croissant d'exploitations développant une activité d'élevage, le panel de choix est un peu plus large une fois les besoins primaires atteints,

car il inclut les choix stratégiques de conduite des troupeaux. En outre, l'étude ne prend pas en compte la pluriactivité, ni les entrées d'argent extérieur, qui sont souvent des éléments importants dans le fonctionnement des exploitations de la zone.

La question se pose alors des moyens dont les agriculteurs disposeraient pour contourner les contraintes, ainsi que de leur faisabilité.

Les principales contraintes résident dans les conditions du milieu (sols pauvres et peu profonds, 900 mm de pluie annuels), qui limitent le nombre d'espèces susceptibles d'être cultivées à ces latitudes. Le manque de moyens pour y répondre se traduit ici par un manque de technologies capables de compenser les effets du milieu. L'exemple le plus simple est l'accès à l'irrigation qui permettrait la culture d'autres espèces, telles les espèces maraîchères et les bananiers. Mais, même en imaginant que les agriculteurs aient accès à l'irrigation, il faudrait aussi qu'ils puissent avoir accès aux semences de ces nouvelles espèces. Mis à part les cultures pratiquées historiquement dans la zone (sorgho, mil, arachide, niébé...), les nouvelles semences n'arrivent en général aux agriculteurs que via des « projets » spécifiques, qui répondent le plus souvent à des demandes du marché. Les facteurs contraignant le choix des agriculteurs ne sont donc pas ou peu compensés par des opportunités qui augmenteraient leur marge de manœuvre dans le choix des assolements.

La plus grande partie des assolements semble régie par la contrainte et non par les opportunités. Mais le peu de marge de manœuvre mise en évidence ne veut évidemment pas signifier qu'un unique chemin est tracé, et que l'agriculteur n'a pas de stratégie. Au contraire, les agriculteurs doivent développer une panoplie de stratégies pour réussir à s'en sortir dans un environnement défavorable et avec le peu de moyens qu'ils ont à leur disposition.

3.5.4. L'entreprise présente dans les objectifs de subsistance de l'agriculteur

La relation contractuelle entre l'entreprise cotonnière et des exploitations agricoles de la zone est l'objet de nombreux débats. En effet, les progrès techniques réalisés depuis l'implantation de l'entreprise, la nouvelle organisation des villages par groupement de producteurs de coton et l'augmentation incontestée du niveau de vie, du moins durant les 10 premières années ayant suivi le boom du coton autour des années 80, sont un facteur de vision favorable à ce modèle développé autour de la filière coton. Cependant, les récentes difficultés rencontrées par la filière, à savoir les baisses des prix du coton fibre à l'international, l'augmentation des doses et des coûts des intrants, l'épuisement progressif des sols et l'échec récemment rencontré de l'introduction du coton génétiquement modifié constituent autant d'arguments recevables, en opposition à ce système.

Cette étude n'a pas les clés pour s'insérer dans ce débat, aucune étude économique n'ayant été réalisée qui pourrait permettre d'estimer l'importance économique de la culture du coton au sein des exploitations. Néanmoins, elle apporte un nouvel angle d'analyse, concernant ces relations contractuelles, en les replaçant dans les processus de prise de décision des agriculteurs.

La stratégie de l'entreprise pour augmenter les surfaces de coton cultivées par les agriculteurs est basée sur : l'échange des surfaces emblavées en coton contre les intrants à crédit, l'engagement d'achat des récoltes, la stabilisation des prix et l'annonce des prix en avance, l'encadrement et la communication sur le terrain. Ces facteurs déterminants liés à l'entreprise cotonnière couvrent environ 22% du total des autres facteurs intervenant dans le choix des

assolements. Sur toutes ces conditions, la seule proposition d'intrants à crédit est responsable de près de 60% des surfaces emblavées en coton. Ce même facteur de décision se retrouve placé dans les règles de décisions primaires de sécurité alimentaire, alors que tous les autres types de stratégies de l'entreprise sont considérées par l'agriculteur en second lieu, pour répondre aux objectifs secondaires.

Ce résultat a une implication forte sur la compréhension des relations contractuelles entre entreprise et agriculteur : il signifie qu'au moins la moitié des surfaces emblavées en coton dans les exploitations est devenue indispensable pour assurer la sécurité alimentaire de la famille, car c'est la condition sine qua non pour obtenir du maïs en quantité suffisante. Les exploitations sont donc pleinement dépendantes de l'entreprise cotonnière. En se rendant indispensable pour couvrir les besoins primaires des familles, l'entreprise s'assure ainsi une production minimum de coton, stable d'une année sur l'autre, en l'absence d'un créancier concurrent qui pourrait offrir lui aussi des crédits pour les intrants.

3.6. Conclusion

La présente étude a montré que les agriculteurs de la province du Tuy, soumis à de nombreuses contraintes et ayant peu d'opportunités, ont une faible marge de manœuvre dans le choix de leurs assolements. Plus de la moitié de leurs surfaces est ainsi destinée à subvenir aux besoins primaires de la famille. Sur toute la période étudiée, les facteurs déterminants externes liés aux prix et aux stratégies incitatives des entreprises sont responsables de moins d'un quart des assolements. L'entreprise cotonnière de la zone réussit néanmoins à maintenir une surface en coton minimum, en se rendant indispensable pour combler les besoins primaires des familles.

Les provinces voisines de la province du Tuy ont vu en quelques années les surfaces en coton diminuer au profit du sésame. Cette transition a été réalisée suite à la promotion du sésame par plusieurs « projets » s'inscrivant dans une filière sésame de mieux en mieux structurée et répondant à des demandes du marché international. Son exemple laisse supposer que de telles transformations pourraient aussi avoir lieu dans la province du Tuy. On peut pourtant douter qu'une telle situation puisse réellement se produire, étant donné les relations contractuelles très intégrées entre producteurs et entreprise. Cet exemple du positionnement des cultures de rente dans les processus de décision des agriculteurs souligne la dépendance de ces derniers aux intermédiaires (« projets », entreprises) qui font le lien entre eux et le marché. Ces intermédiaires leur offrent les seuls choix possibles de cultures autres que les céréales de base, les agriculteurs n'ayant pas directement accès au marché et aux semences. Un entretien dans l'un des villages au Nord de la zone avait été particulièrement parlant par rapport à cette situation, l'agriculteur interrogé sur ses choix de culture avait répondu par la phrase suivante : « que faire d'autre ? ».

Par ailleurs, l'étude offre d'importantes perspectives méthodologiques concernant l'utilisation des modèles spatiaux pour renforcer et valider les typologies et processus issus d'analyses de terrain. La modélisation spatiale permet de dépasser les limites des typologies de terrains, à savoir un risque de faible représentativité et de subjectivité, en les spatialisant et évaluant leur cohérence à une échelle régionale. L'appréhension, à l'échelle régionale, de dynamiques observées au niveau de l'exploitation offre un outil précieux pour le conseil aux décideurs des politiques publiques.

Chapitre V :

Vers une amélioration
du suivi des changements
des agroécosystèmes,
par croisement
entre modélisation spatiale
et information satellitaire



Chapitre V : Vers une amélioration du suivi des changements des agroécosystèmes, par croisement entre modélisation spatiale et information satellitaire

Ce chapitre présente les travaux réalisés, en vue d'améliorer l'extraction d'information dans une image satellitaire de moyenne résolution spatiale, à l'aide du modèle présenté aux chapitres précédents. Il répond à la dernière question de recherche, **Comment utiliser conjointement les modèles de dynamiques agraires et les données de télédétection pour i) améliorer l'extraction d'information concernant des objets de taille très inférieure à la résolution des images satellitaires, ii) renforcer les modèles de dynamiques agraires ?** L'objectif de ce chapitre est d'aller vers une meilleure compréhension des signaux de végétation contenus dans les images, tout en renforçant les outils de modélisation des processus d'évolution de la végétation.

Une première partie présente un rappel sur les indices de végétation produits à partir des données satellitaires et de leur utilisation avec les modèles de culture par les méthodes d'assimilation.

Le dernier article de la thèse est ensuite présenté. Une méthode y est développée pour identifier de manière explicite, dans les images de moyenne résolution spatiale, les processus anthropiques responsables des évolutions de la végétation. À partir de ces identifications, une méthode d'assimilation des données satellitaires dans le modèle est présentée, et son implication concernant l'utilisation de la télédétection dans le but d'améliorer les performances de modèles de dynamiques des agroécosystèmes est discutée.

1. Rappel sur les méthodes d'assimilation de données de télédétection dans les modèles de culture

1.1. Les indices de végétation issus de la télédétection

1.1.1. Comportement de la végétation dans les images

Chaque élément d'un paysage émet un rayonnement électromagnétique et réfléchit une partie de celui qu'il a reçu du soleil. C'est une mesure de ce rayonnement dans différentes bandes de longueurs d'onde qui est enregistrée par les capteurs des satellites.

La signature spectrale de la végétation (sa courbe de réponse – appelée réflectance - dans les différentes longueurs d'onde) dépend des propriétés optiques des feuilles (teneur en eau et en chlorophylle), de la structure des feuilles, du couvert, de l'architecture et de l'agencement des plantes, ainsi que du stade de développement de la plante. Les trois gammes de longueurs d'onde majoritairement utilisées pour l'étude de la végétation sont le visible (400 à 700 nm), le proche infrarouge (700 à 1300 nm) et l'infrarouge moyen (1300 à 2500 nm).

Les pigments foliaires de chlorophylle a et b absorbent dans le bleu et le rouge et ont donc un maximum de réflectance dans le vert (autour de 550 nm). La réflectance de la végétation est néanmoins plus forte dans le proche infrarouge, influencée par la structure interne des feuilles. Les réflectances dans le visible et le proche infrarouge évoluent au cours du cycle de développement de la plante, liés aux changements de physiologie (dus au passage d'un stade phénologique à un autre, ou à un stress de la plante).

1.1.2. Production d'indicateurs

L'extraction du signal de la végétation dans les images va donc pouvoir se faire, en utilisant les bandes dans lesquelles la végétation absorbe et réfléchit le plus, à savoir le rouge et le proche infrarouge. Une panoplie d'indicateurs a ainsi été développée en combinant ces deux bandes pour obtenir des informations plus ou moins ciblées. Les indicateurs les plus connus sont le RVI, NDVI, NDWI. D'autres, plus complexes, prennent en compte l'influence des sols (PVI, SAVI) ou les effets de l'atmosphère (EVI) (tab.12).

Parmi eux, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est l'indice le plus utilisé, étant sensible à la fois à l'activité photosynthétique et à la structure du couvert, apportant des informations liées à plusieurs caractéristiques des plantes (leur stade phénologique, leur biomasse végétale, leur état de santé).

Table 12: Différents indices de végétation (Leroux, 2015).

Indice de végétation	Formule	Caractéristiques	Reference
RVI (Ratio Vegetation Index)	PIR/R	Sensible aux sols et aux effets atmosphériques Saturation avec l'augmentation de la densité de végétation	Krieger <i>et al.</i> , 1969
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(PIR-R)/(PIR+R)$	Sensible aux sols et aux effets atmosphériques, aux conditions de prise de vue	Rouse <i>et al.</i> , 1974
NDWI (Normalized Difference Water Index)	$(PIR-MIR)/(PIR+MIR)$	Varie en fonction de la teneur en eau dans les feuilles	Gao, 1996
PVI (Perpendicular Vegetation Index)	$1 \frac{1}{\sqrt{a+1}}(PIR - R - b)$	Diminue la contribution du sol	Richardson and Wiegand, 1977
SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	$(PIR-RB)/(PIR+RB)$ Avec $RB=R-\gamma(B-R)$ et γ fonction du type d'aérosol	Diminue la contribution du sol	Huete, 1988
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$2.5*(PIR-R)/(PIR+C1*R+C2*B+L)$ Avec L=facteur d'ajustement des sols et C1, C2 les coefficients de correction de la diffusion atmosphérique	Réduit les contributions du sol et de l'atmosphère	Huete <i>et al.</i> , 1999

Le traitement des images permet aussi d'estimer des variables biophysiques de couvert, comme la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par le couvert (le FAPAR : *Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*) ou l'indice foliaire (le LAI : *Leaf Area Index*). Ces deux variables dérivent directement de relations semi-empiriques entre les indices de végétation ou les réflectances et les mesures de biomasse.

Ces indicateurs et variables biophysiques issus des images de télédétection trouvent de nombreuses applications, et sont notamment utilisés dans les méthodes de forçage ou d'assimilation.

1.2. Les méthodes d'assimilation

Plusieurs approches utilisent ces indicateurs et variables dans des méthodes de forçage ou d'assimilation de données dans les modèles de culture (cf chapitre I, 3.3). Nous traitons ici les méthodes d'assimilation, en lien avec la suite du travail de thèse.

L'assimilation de données de télédétection dans les modèles de culture consiste à utiliser l'information issue des images satellitaires pour améliorer les capacités du modèle à simuler de manière plus fiable le développement biologique des espèces cultivées (François *et al.*, 2001).

L'assimilation est en général employée pour deux types d'applications différents : le filtrage et le lissage (Fig. 62). Le filtrage consiste à corriger la trajectoire des variables simulées, au cours

de la période simulée, en intégrant les données satellitaires au fur et à mesure de leur réception. Ainsi, le modèle est initialement lancé jusqu'à un temps t , puis les informations satellitaires collectées durant cette période sont combinées avec l'état du système simulé à cet instant t , dans le but de calculer un état initial ($t+1$) optimal pour faire tourner le modèle pendant la durée de la fenêtre temporelle suivante ($t+1$).

Le lissage a pour but d'améliorer la simulation de l'état d'un système, sur la totalité d'une fenêtre temporelle. Ainsi, la solution globale du système est adaptée à toutes les informations récoltées durant la fenêtre temporelle totale de la simulation.

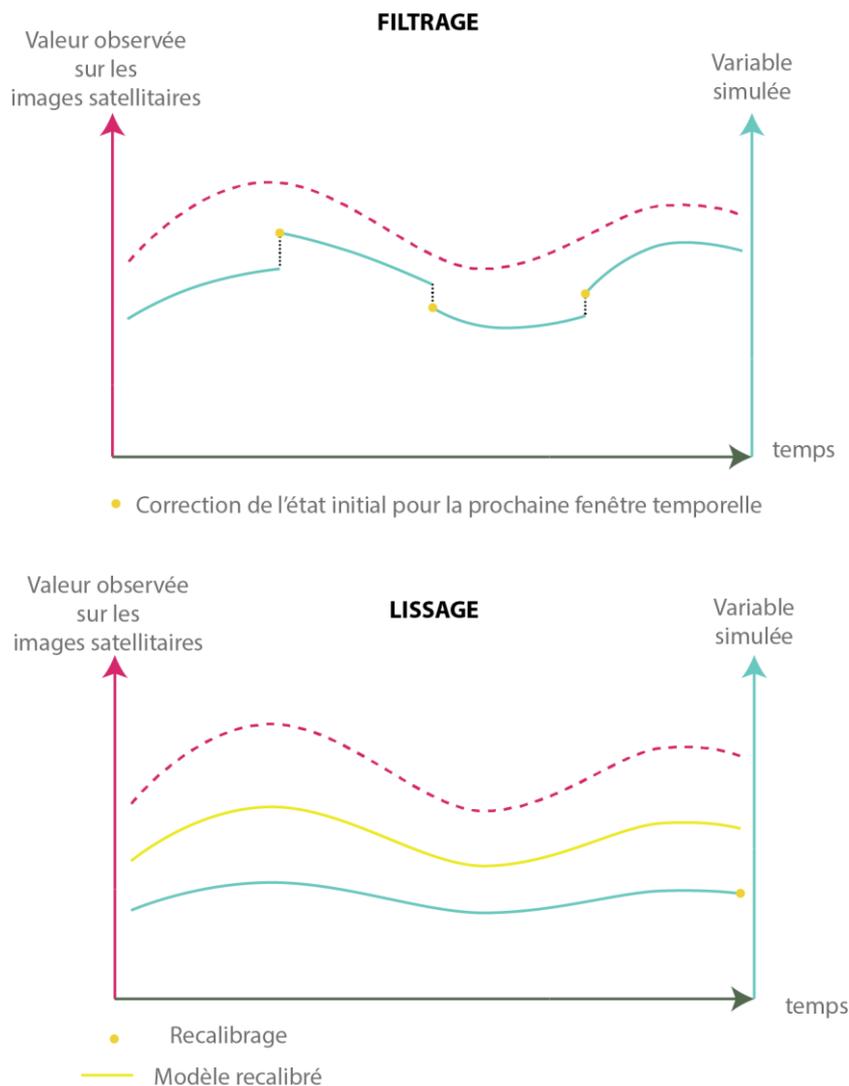


Figure 62: Schéma des deux approches : filtrage et lissage.

Plusieurs méthodes d'assimilation existent. Une classification de ces méthodes, couramment utilisée pour les modèles de culture, consiste à distinguer les méthodes séquentielles des méthodes non séquentielles (Bouttier et Courtier, 1999, cité dans Lauvernet, 2005).

Les méthodes séquentielles (ou de correction) sont adaptées au filtrage, puisqu'elles utilisent les informations satellitaires du passé pour corriger la trajectoire d'une ou de plusieurs variables du modèle (mise à jour des variables du modèle à l'instant t). Elles ont recours, la plupart du temps, à des procédés stochastiques, qui consistent à corriger la trajectoire des variables du modèle, dès qu'une donnée satellitaire est disponible, de manière à minimiser la distance entre valeur de l'indice issu des images et valeur de la variable simulée.

Les méthodes non séquentielles (ou recalibrage), correspondant quant à elles au lissage, peuvent utiliser des informations satellitaires postérieures à l'état du système, à l'intérieur d'une fenêtre temporelle, pour mettre à jour les variables du système sur une plage t_0-t . Elles font en général appel aux méthodes variationnelles, qui consistent à minimiser un écart quadratique entre l'état final du système simulé et l'ensemble des observations satellitaires, sur toute la durée de la simulation.

Si certains travaux ont utilisé les méthodes séquentielles pour assimiler les données satellitaires avec les modèles de culture (Olios et al., 2002; Cayrol, 2000 ; François et al., 2001), la majorité des assimilations concernant les modèles de culture font appel aux méthodes non séquentielles. La plupart de ces travaux convertissent les sorties des modèles de culture en valeurs de réflectance à l'aide d'un modèle de transfert radiatif (fig.63). Cela permet de comparer les mêmes types de variables, issues des modèles de culture et des données satellitaires. Pour citer quelques exemples, Clevers (1997) utilise le fAPAR, dérivé de l'indice de végétation WDVI, pour améliorer les estimations de rendement de la betterave avec le modèle SUCROS. Weiss et al. (2001) utilisent le modèle de culture STICS et le modèle de transfert radiatif SAIL, pour estimer plusieurs variables, dont le LAI, assimilé avec les données satellitaires SPOT. Enfin, Morel et al. (2013) recalibrent le modèle de croissance de la canne à sucre MOSICAS, à partir du fIPAR (*fraction of intercepted photosynthetically active radiation*) issu de données SPOT.

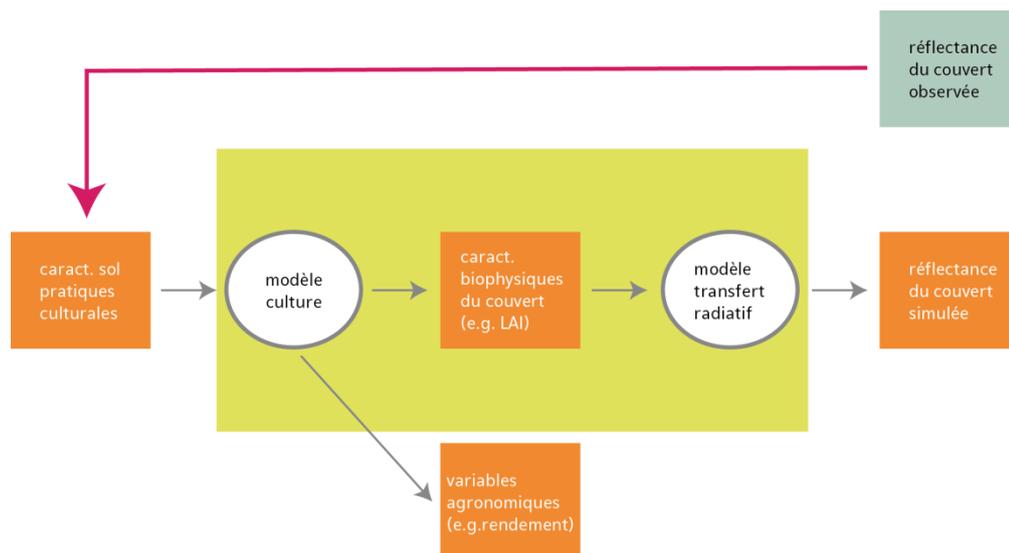


Figure 63: Différentes méthodes d'assimilation dans les modèles de culture (adapté de Lauvernet, 2005).

Comme indiqué au chapitre I (3.3.), de telles méthodes d'assimilation n'ont encore jamais été utilisées pour améliorer les modèles de dynamiques des agroécosystèmes à partir de données satellitaires.

La démarche que nous présentons dans le prochain article s'inspire des méthodes développées pour les modèles de culture, afin de tester l'assimilation de données satellitaires dans un modèle de dynamiques des agroécosystèmes.

Pour faire le lien avec ce rapide rappel, l'approche que nous développons dans le prochain article s'apparente à une démarche de lissage et s'inscrit donc dans les approches non-séquentielles. Nous nous limiterons pour cette thèse à démontrer, à partir d'un exemple, qu'une telle démarche est possible pour les modèles de dynamiques des agroécosystèmes, sans développer pour l'instant de méthode élaborée et automatisée comme dans les travaux précédemment cités.

2. Article 4 : Détecter les processus de changement des paysages dans les images, le lien entre modélisation spatiale et télédétection.

Jahel Camille, Leroux Louise, Castets Mathieu, Bellón Beatriz, Bégué Agnès, Baron Christian, Lo Seen Danny

1.3. Introduction

Le recours à la télédétection est devenu quasi systématique pour ce qui concerne l'étude des évolutions d'un paysage. Cet outil fournit en effet des informations sur les propriétés des surfaces ainsi que sur l'occupation/utilisation du sol à différentes périodes, ce qui permet de caractériser et de quantifier les changements.

La prise en compte de ces informations extraites des images satellitaires est essentielle pour l'élaboration de politiques territoriales par les décideurs (National Research Council, 2013). Leurs décisions sont généralement prises à une échelle administrative et concernent ainsi des territoires étendus : de ce fait, l'utilisation d'images satellitaires couvrant régulièrement de larges zones s'avère indispensable.

Parmi les différents capteurs existants, le capteur MODIS répond le mieux à ces exigences, fournissant des images à une résolution temporelle journalière avec une fauchée de plus de 2000 km. Les images issues de ce capteur présentent néanmoins l'inconvénient d'être de moyenne résolution spatiale (entre 250 m et 500 m), entravant une étude fine des changements de paysages. Cette imprécision est particulièrement problématique en Afrique de l'Ouest, où les paysages sont fragmentés et où les parcelles de cultures de petite taille contiennent une importante densité d'arbres, ce qui rend difficile l'analyse de ces données satellitaires à moyenne résolution spatiale (Bégué et al., 2016). Plusieurs études ont néanmoins contribué à la caractérisation des changements de paysage en Afrique de l'Ouest à partir d'images à moyenne résolution spatiale, développant diverses méthodes pour contourner ce problème de définition des images (Gessner et al., 2015 ; Vintrou et al., 2012 ; Vancutsem et al., 2011 ; Lambert et al., 2016).

Mais si les images fournissent des informations concernant l'évolution des paysages, elles ne permettent pas de comprendre l'origine de ces changements. Faire le lien entre changements observés et facteurs ou processus déclencheurs est pourtant indispensable pour leur suivi et accompagnement. Plusieurs travaux réalisés en ce sens croisent des données issues de la télédétection avec des données socio-économiques ou environnementales (Vlek et al., 2010 ; Kindu et al., 2015 ; Brandt et al., 2016 ; Leroux et al., 2016). Si ces méthodes permettent d'identifier certains facteurs clés responsables des évolutions, elles n'offrent pas la possibilité d'analyser de manière explicite les processus responsables des changements.

De tels processus sont généralement explorés à l'aide de modèles de dynamiques des agroécosystèmes. Mais peu de liens sont établis entre ces modèles et les images satellitaires, hormis dans l'utilisation de ces images comme support au modèle. Il n'existe à notre connaissance aucune étude liant explicitement les processus modélisés, sous-jacents aux dynamiques paysagères, aux images satellitaires. De même, si les modèles de culture ont parfois recours à une assimilation à l'aide de l'information satellitaire (e.g. Lauvernet, 2005 ;

François et al., 2001), cette méthode n'a jamais été appliquée aux modèles de dynamiques des agroécosystèmes.

L'objectif de cet article est donc double : d'une part il s'agit de **comprendre les évolutions des paysages observées sur les images satellitaires et de les relier de manière explicite aux processus étant à l'origine des changements**. D'autre part, il s'agit d'utiliser les **informations issues des images dans le but d'améliorer les performances des modèles de dynamiques des agroécosystèmes**.

L'étude réalisée se focalise sur les évolutions de la végétation ayant eu lieu depuis les années 2000 dans l'ouest du Burkina Faso. Elle croise des tendances de végétation extraites de séries temporelles d'images MODIS avec les simulations d'un modèle multiscalair des dynamiques de l'agroécosystème de la zone.

Une première partie consiste à présenter la zone d'étude, les tendances de végétation et le modèle utilisé et à détailler la méthodologie adoptée. Une seconde partie présente les résultats, à savoir d'une part l'identification des facteurs et processus d'importance dans les tendances de végétation, et d'autre part l'assimilation de données satellitaires dans le modèle. Une dernière partie permettra de discuter ces résultats et de replacer la contribution de l'étude dans le cadre des liens entre modèles de dynamiques des agroécosystèmes et les données satellitaires.

1.4. Données et méthode

1.4.1. Données

a. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est la province du Tuy, de 6000 km², située au centre-ouest du Burkina Faso. Le climat est de type soudanien. La zone est traversée par un massif collinaire ne dépassant pas les 400 m d'altitude, séparant deux grandes plaines aux sols ferrugineux. 20% du territoire est classé en forêt protégée depuis 1990, le reste étant majoritairement dédié aux cultures, dont les principales sont le coton, le maïs et le sorgho.

La zone a connu d'importants changements au cours des 15 dernières années, majoritairement liés à l'introduction de nouvelles variétés et techniques culturales et à l'accroissement du domaine cultivé (cf articles 2 et 3 de la thèse).

b. Détection des tendances de végétation à partir de séries temporelles d'images MODIS

L'étude se base sur un travail réalisé en 2016 par Leroux et al., consistant à utiliser des séries temporelles de l'indice de végétation NDVI (indice de végétation par différence normalisé) issues des données MODIS (résolution spatiale à 250 m et résolution temporelle à 16 jours) pour analyser les tendances de végétation de la zone d'étude entre 2000 et 2015.

Le NDVI est reconnu pour être un indicateur de l'activité photosynthétique des surfaces végétales et par conséquent relié à de nombreuses propriétés du couvert comme le LAI (Leaf Area Index), le fAPAR (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) ou la quantité de biomasse verte (Tucker., 1979 ; Holben et al., 1980 ; Hatfield et al., 1984). Il se construit par le rapport de la différence des canaux proche infra-rouge et rouge. Ses valeurs sont comprises entre -1 et 1, les valeurs proches de 0 indiquent généralement la présence de sol nu, les valeurs qui tendent vers -1 concernent essentiellement les surfaces en eau, alors que celles s'approchant de 1 concernent les formations végétales denses.

Pour chaque année, des tendances de NDVI ont été déterminées pour chacun des pixels en utilisant une régression linéaire simple entre une variable temporelle et des cumuls annuels de NDVI par pixel. Le coefficient de pente des régressions et la probabilité critique (ou p-value) qui lui est associée permettent ainsi de déterminer les tendances de NDVI : les pentes positives et significatives ($p\text{-value} > 0.05$) indiquent des tendances d'augmentation du NDVI (soit une tendance à l'augmentation de la production de biomasse végétale), et les pentes négatives représentent une diminution du NDVI (soit une tendance à la dégradation de la biomasse végétale) au cours des 15 années considérées. Les données résultantes pour la province du Tuy ont été extraites à partir des données originelles qui concernent toute l'Afrique de l'Ouest (figure 64).

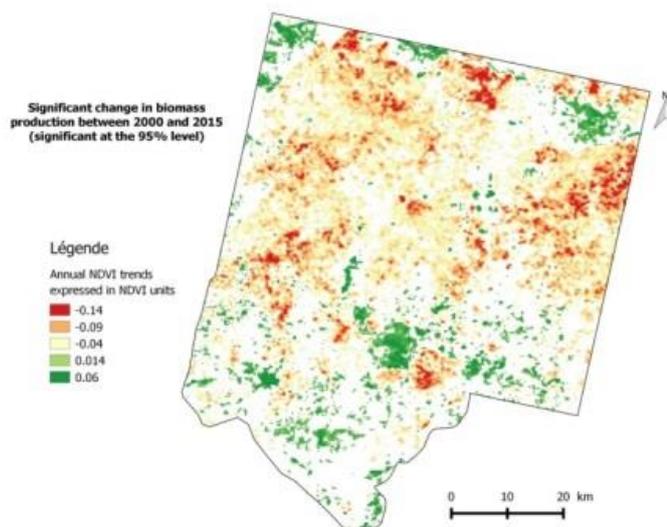


Figure 64: Tendances de NDVI entre 2000 et 2015 dans la zone d'étude (Leroux et al., 2016).

c. Modèle des dynamiques de l'agroécosystème de la province du Tuy

L'étude utilise un modèle existant et validé (Jahel et al., 2016), construit sur la plateforme de modélisation Ocelet (Degenne et Lo Seen, 2016 ; Castets, 2015). Le modèle simule les dynamiques de l'agroécosystème ayant eu lieu ces quinze dernières années dans la province du Tuy à plusieurs échelles. Trois phénomènes sont modélisés :

- **l'avancée annuelle du domaine cultivé aux dépens de zones de végétation naturelle.** Ce phénomène résulte de trois processus modélisés : l'agrandissement des

surfaces des exploitations, l'installation de nouvelles exploitations par nucléarisation et l'installation de nouvelles exploitations par arrivée de migrants (cf. article 2 de la thèse).

- **la construction annuelle des assolements cultureux.** Chaque année, chaque exploitation choisit et alloue ses cultures aux parcelles en fonction de facteurs déterminants internes (ressources de l'exploitation en travail, en capital et en terres) et externes (prix des cultures, pluviométrie, possibilité de contrats avec des entreprises ou des acteurs porteurs de projets) (cf. article 3 de la thèse).
- **le développement biologique journalier des cultures.** Il consiste à simuler chaque jour le développement des plantes selon trois grands processus : le bilan carbone, le bilan hydrique et la phénologie. Ce développement dépend de données climatiques (pluviométrie, rayonnement solaire, température, etc.), pédologiques et des pratiques des agriculteurs. À la fin de la saison, plusieurs indicateurs sont produits pour chaque culture comme les rendements ou la surface foliaire (LAI) maximale atteinte. Notre étude utilisera ce dernier indicateur qui permet d'évaluer la production de biomasse végétale par les plantes.

La figure 65 présente un exemple des sorties obtenues annuellement avec le modèle.

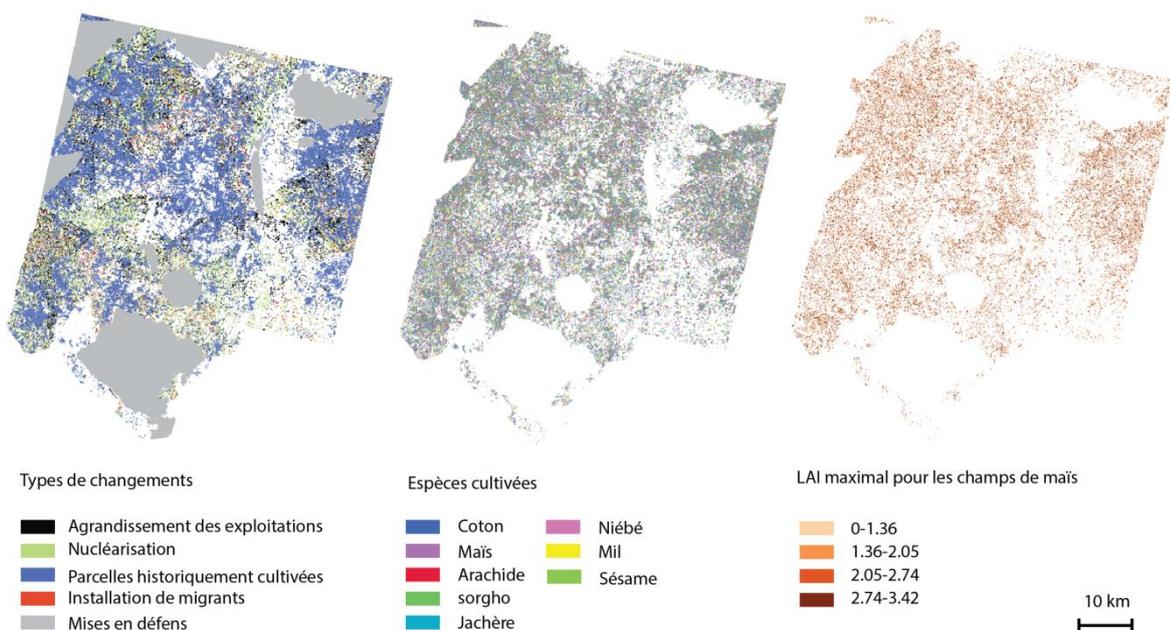


Figure 65: Sorties du modèle : exemple des trois cartes obtenues pour l'année 2010.

1.4.2. Méthode

La méthode se divise en trois étapes (fig. 66). La première (a) consiste à vérifier que le modèle simule globalement des tendances de végétation (NDVI) proches de celles identifiées dans les séries temporelles d'images satellitaires et à repérer les zones les plus en accord. Pour ces dernières, (b) les tendances de NDVI peuvent alors être expliquées par les différents processus et facteurs présents dans le modèle. Une dernière étape (c) vise à réétalonner le modèle pour les zones en désaccord, à partir de l'interprétation des tendances de NDVI en combinaison de

facteurs et processus. Ce réétalonnage consiste in fine à assimiler des données satellitaires dans le modèle de dynamiques de l'agroécosystème.

a. Vérification d'une cohérence entre tendances simulées et tendances de NDVI

Le modèle simule trois indicateurs d'évolution de la végétation, à savoir l'évolution des surfaces en végétation naturelle, l'évolution des proportions des différentes cultures au sein du domaine cultivé, et l'évolution de l'indice de surface foliaire (LAI) maximal, i.e. la surface foliaire totale de la plante divisée par la surface au sol couverte par la plante, pour le maïs.

L'objectif de cette première étape est de vérifier qu'il y a une corrélation entre les tendances du NDVI et les tendances d'évolution des surfaces en végétation naturelle, des proportions culturales et du LAI maximal. Pour ce faire, i) les tendances des indices de végétation simulées par le modèle sont calculées, ii) plusieurs types de corrélations entre les tendances de NDVI et les tendances des indices de végétation simulés par le modèle sont testés pour enfin iii) sélectionner les zones cohérentes avec les tendances de NDVI et celles ne l'étant pas.

i) Calcul des tendances simulées de végétation :

Nous disposons des sorties annuelles du modèle, à savoir les propriétés de toutes les parcelles, chaque année, pendant les 15 ans de simulation (Jahel et al., 2016). Nous nous intéressons à trois propriétés : l'état d'appartenance au domaine cultivé ou à la végétation naturelle, son type de culture (nous nous focalisons sur le maïs), le LAI maximal atteint si la culture était du maïs.

Une première étape consiste à agréger ces résultats sur une grille de 4*4km². Chaque case de la grille contient pour chaque année les surfaces en végétation naturelle, les proportions de maïs au sein du domaine cultivé et la moyenne du LAI maximal. Les tendances sont ensuite calculées pour chaque case en utilisant des régressions linéaires simples. La régression s'établit entre chaque valeur annuelle de l'indice et un vecteur temporel (allant de 2000 à 2014), et s'exprime ainsi :

$$\text{Indice} = \alpha + \beta \cdot \text{temps}$$

avec α l'ordonnée à l'origine qui donne la valeur de l'indice la première année, et β le coefficient de pente. Les tendances sont exprimées par la valeur β , qui désigne l'évolution de l'indice par unité de temps.

L'opération est appliquée pour chaque case de la grille et pour les trois indices, de manière à obtenir au final, pour chaque case, une tendance d'évolution des surfaces en végétation naturelle, une tendance d'évolution de la proportion de maïs et une tendance d'évolution de la moyenne du LAI maximal du maïs.

ii) Tests de corrélation entre tendances de NDVI et tendances des indices de végétation simulés par le modèle :

Deux types de tests sont réalisés. Tout d'abord, un test de corrélation de Pearson est utilisé pour évaluer la corrélation entre les tendances de NDVI et les tendances de chacun des trois indicateurs issus du modèle indépendamment des autres. On considère que les variables sont corrélées de façon significative si la p-value est inférieure à 0.05. Plus la valeur absolue du coefficient sera proche de 1, plus la corrélation sera forte.

Des régressions linéaires multiples sont ensuite réalisées pour tester les relations entre les tendances de NDVI et différentes combinaisons de tendances issues du modèle (tendances de végétation naturelle + tendances de LAI ; tendances de proportion de maïs + tendances de LAI ; tendances de végétation naturelle + tendances de proportion de maïs ; tendances de proportion de maïs + tendances de végétation naturelle + tendances de LAI). Le degré de significativité de ces régressions est évalué *via* la valeur de la p-value, en se référant au même seuil de 0.05.

iii) Identification des valeurs aberrantes et sélection des zones cohérentes

Les cases de la grille dont les tendances des différents indicateurs sont les plus divergentes de celles de NDVI ont été identifiées.

Une méthode de détection des points atypiques est appliquée :

- Les résidus de chaque régression sont normalisés
- Un seuil est calculé à partir de la loi de Student avec un risque alpha de 0.1
- Les résidus dont la valeur absolue dépasse ce seuil sont sélectionnés.

Les cases de la grille ainsi identifiées seront retirées des analyses à suivre et feront ensuite l'objet des rééchantillonnages.

Les autres cases de la grille, identifiées comme en étant cohérentes avec les tendances de NDVI pour au moins un indicateur, sont gardées pour la suite du travail.

b. Interprétation des classes de tendance de NDVI par association à des combinaisons de facteurs

Cette étape ne peut se faire que si l'étape précédente aboutit à mettre en évidence des corrélations entre les tendances du NDVI et les tendances des indices simulés. Le cas échéant, les tendances de NDVI peuvent être expliquées par les différents processus ayant conduit aux tendances de LAI, de proportion de maïs et d'évolution des surfaces naturelles.

En effet, l'évolution des surfaces en végétation naturelle résulte des processus de défriche dont les moteurs sont l'agrandissement des exploitations agricoles, la nucléarisation et l'installation de migrants. Les facteurs freins des défriches sont les mises en défens de certaines parties de la forêt (zones protégées), les zones à forte pente, et les zones historiquement cultivées.

Les proportions de maïs résultent quant à elles de combinaisons de facteurs tels que les prix, les conditions climatiques, l'accès aux semences ou l'établissement de contrats avec les entreprises.

Enfin, le LAI est simulé en fonction de données climatiques, de données de sols, et de données de techniques culturales. Dans cette étude, seules les données pluviométriques sont prises en compte, les autres ayant une très faible variabilité spatiale ou étant constantes sur toute la période. Les données pluviométriques ont été au préalable transformées en tendances pluviométriques par l'utilisation de la même méthode de régression simple que plus haut, à partir de la moyenne annuelle des pluies.

Nous noterons que le modèle produit des indications sur les facteurs (pluviométrie, zone à fortes pentes, etc.) et les processus (agrandissement des exploitations, nucléarisation, etc.) responsables des dynamiques.

Leroux et al. avaient classé les tendances de NDVI en 7 classes, en fonction de leur pente et de leur significativité (tab.13). Une caractérisation de ces classes au regard de différentes données socio-économiques avait été réalisée pour une zone d'étude au Niger. Il s'agit ici d'approfondir cette caractérisation sur notre zone d'étude, en utilisant les processus simulés par le modèle. Une première étape consiste à agréger les classes de tendances de NDVI sur la grille utilisée précédemment.

Ensuite, de la même manière que Leroux et al., nous utilisons l'algorithme Random Forest qui permet d'évaluer la contribution de chaque facteur et processus à chacune des classes de tendances. Les 7 classes de tendances sont les variables à caractériser, et les variables simulées par le modèle sont les facteurs et processus explicatifs. Les facteurs et processus choisis pour caractériser les classes sont ceux liés aux tendances d'indices de végétation (i.e. végétation naturelle, proportions de maïs et LAI max) ayant montré une corrélation avec les tendances de NDVI à l'étape précédente.

Table 13: Classement et interprétation des tendances de NDVI (Leroux et al., 2015).

Classe	Pente	p-value	Interprétation
-3	<0	p-value<0.001	Tendance négative forte
-2	<0	0.001<p-value<0.01	Tendance négative modérée
-1	<0	0.01<p-value<0.05	Tendance négative faible
0	<0 ou >0	p-value>0.05	Pas de tendance significative
1	>0	0.01<p-value<0.05	Tendance positive faible
2	>0	0.001<p-value<0.01	Tendance positive modérée
3	>0	p-value<0.001	Tendance positive forte

L'algorithme Random Forest est une méthode d'apprentissage supervisé utilisée pour établir des classifications. Le principe est de générer des arbres de décision, basés sur un extrait de points d'observation aléatoires associé à un extrait de variables sélectionnées aléatoirement, qui seront ensuite agrégés en classes (Breiman, 2001). L'algorithme permet en outre de mettre en évidence des variables d'importance, en évaluant les contributions des variables pour

chacune des classes. L'indice Mean Decrease in Accuracy, fourni par l'algorithme, mesure l'importance de chaque variable pour tout le modèle (toutes classes confondues) ainsi que pour chaque classe de tendance prise individuellement. Il est issu de tests de permutation entre les variables : si la permutation d'une variable avec une autre entraîne une augmentation de l'erreur du modèle, cette variable sera considérée comme importante. L'algorithme a été appliqué dans cette étude via l'utilisation du package R RandomForest (Liaw and Wiener, 2002).

A la fin de cette étape, les différentes classes de tendances de NDVI sont caractérisées par une combinaison de variables explicatives dont le poids diffère pour chaque classe.

c. Assimilation de données de télédétection dans le modèle à partir de l'interprétation des tendances de NDVI en combinaison de facteurs

L'étape précédente a consisté à caractériser les différentes classes de NDVI pour des zones dont les dynamiques modélisées étaient corrélées aux tendances de NDVI, à partir des facteurs et processus explicatifs issus du modèle.

Il s'agit maintenant d'utiliser cette caractérisation mise en évidence pour réétalonner les zones classées « aberrantes » à l'issue des régressions linéaires. Pour cet article, nous nous limiterons à un exemple de réétalonnage de quelques points, dans une optique de démonstration des potentialités offertes par cette approche d'assimilation, en anticipation de recherches futures.

Quelques points aberrants sont choisis, tous appartenant à une même classe de tendances de NDVI. Les valeurs des facteurs et processus simulés pour ces points par le modèle sont comparées aux facteurs et processus ayant été identifiés pour caractériser la classe de tendances à laquelle appartiennent ces points. Les facteurs et processus simulés ayant les valeurs les plus divergentes de celles des facteurs et processus de la classe sont sélectionnés.

Le modèle est ensuite relancé, une assimilation des données satellitaire est réalisée pour les facteurs et processus identifiés sur les points aberrants : les nouvelles valeurs de ces facteurs et processus sont les mêmes que celles des facteurs et processus caractérisant la classe de tendance concernée. Les nouvelles valeurs des indices de végétation ainsi simulés sont alors comparées aux tendances de NDVI pour ces cases, en relançant les régressions linéaires.

Si nouvelles valeurs des indices de végétation de ces points ne sont plus dans les valeurs extrêmes des différences entre tendances NDVI et tendances issues du modèle, cela signifiera que l'assimilation de données satellitaires, en jouant sur les facteurs et processus, a réussi.

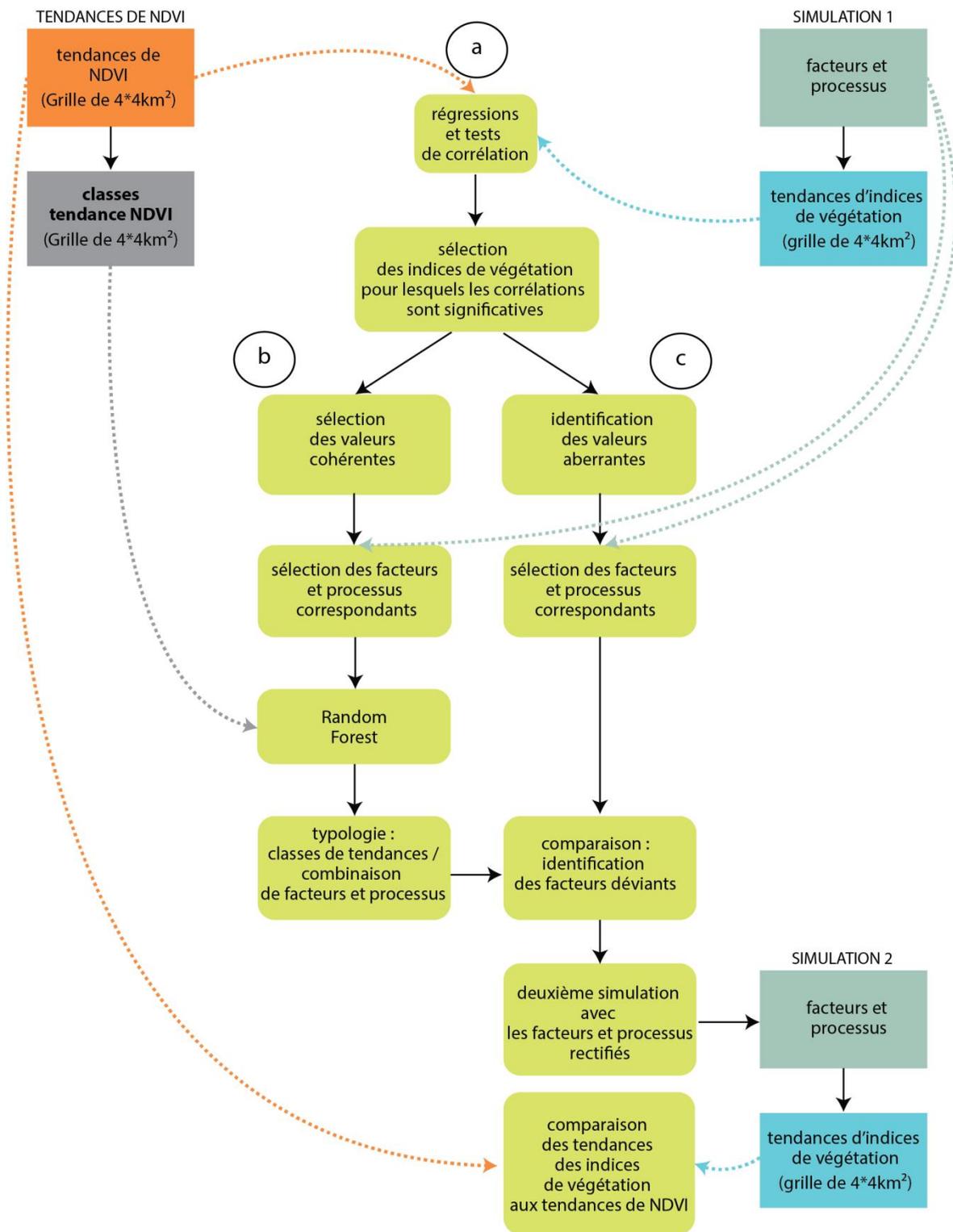


Figure 66. Méthodologie.

1.5. Résultats

1.5.1. Présentation des corrélations

Les corrélations obtenues entre les trois indices de végétation simulés et les tendances de NDVI sont faibles, mais néanmoins très significatives pour les tendances d'évolution des surfaces en végétation naturelle et pour les tendances de LAI. Les tendances de proportion de maïs ne montrent aucune corrélation avec celles du NDVI (avec une très faible significativité), nous les retirons donc des analyses ultérieures. Les régressions multiples présentent quant à elles un R^2 très faible (tab 14).

Table 14: Résultats des tests de corrélation (test de Pearson) et des régressions linéaires.

Variables comparées	Coefficient de corrélation (Pearson)	R^2 régression	p-value régression ou test de Pearson
NDVI/ végétation naturelle	0.45	0.2	$2.2 \cdot 10^{-16}$
NDVI/LAI	0.25	0.065	0.009
NDVI/proportion maïs	-0.1	0.01	0.03
NDVI/ végétation naturelle +LAI		0.084	
NDVI/ végétation naturelle +proportion maïs		0.037	
NDVI/LAI + proportion maïs		0.074	
NDVI/ végétation naturelle +proportion maïs+ LAI		0.093	

Pour les tendances de LAI comme de végétation naturelle, la pente de la regression linéaire simple est positive ce qui signifie que lorsque les tendances de NDVI augmentent, les tendances de LAI et de végétation naturelle augmentent. Notons que les tendances d'évolution des surfaces en végétation naturelle sont toutes inférieures ou égales à 0, le modèle n'ayant simulé que très peu de recrudescence de végétation naturelle. Plus les tendances de NDVI sont faibles, plus les tendances de surfaces en végétation naturelles sont faibles et plus les tendances de LAI, donc de production de végétation, sont faibles (figure 67).

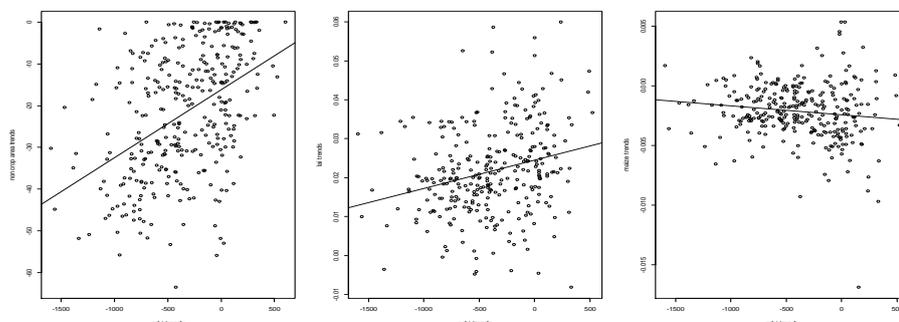


Figure 67: Régressions linéaires (de gauche à droite : tendances d'évolution des surfaces en végétation naturelle/tendances de NDVI, tendances de LAI/tendances de NDVI, tendances des proportions de maïs/NDVI).

1.5.2. Facteurs explicatifs des tendances

Les facteurs choisis pour faire tourner Random Forest sont les facteurs responsables de l'évolution des surfaces cultivées et de l'évolution du LAI. 5 facteurs sur les 7 ont un poids supérieur à 10%, ce qui signifie que globalement, tous les facteurs utilisés ont un impact sur les tendances de NDVI. Le facteur ayant le plus de poids dans l'explication des différentes classes est celui des tendances de pluie. Trois autres facteurs moins importants ont un poids équivalent, à savoir les zones de défens, les défriches par agrandissement et les surfaces historiquement cultivées (figure 68).

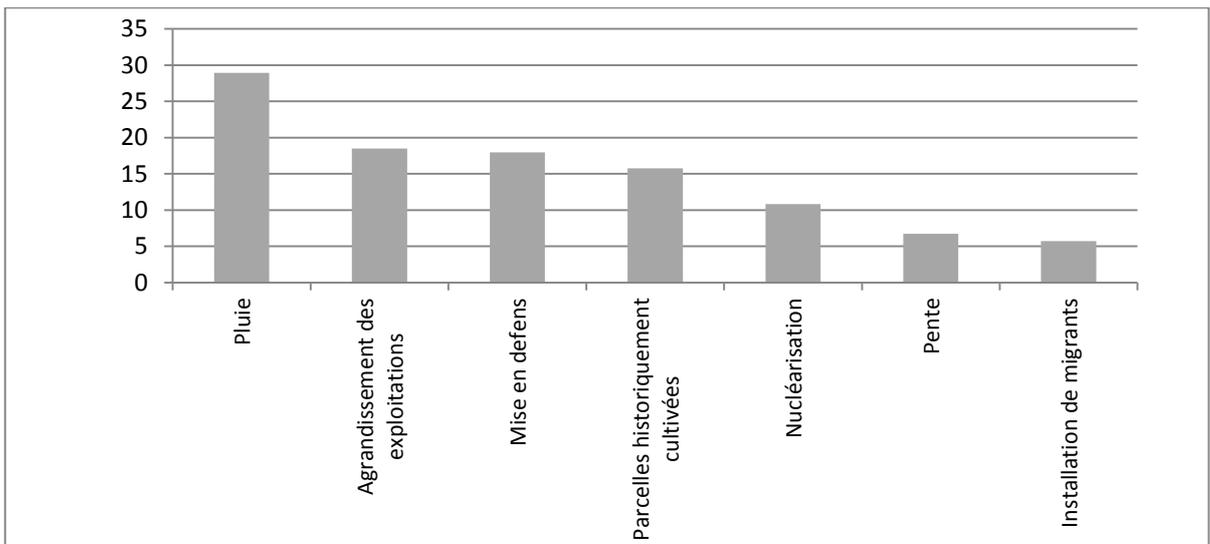


Figure 68: Sorties de l'algorithme Random Rorest : Mean Decrease in Accuracy.

On constate aussi que certains facteurs ont un poids dans toutes les classes de tendances, comme les surfaces historiquement cultivées ou la mise en défens alors que d'autres n'apparaissent que dans certaines classes, comme la nucléarisation ou les migrations. La classe 3 se démarque des autres par la contribution négative du facteur de nucléarisation. Pour la classe -1, se sont les facteurs de mise en défens et les processus d'agrandissement des exploitations et d'installation de migrants qui ressortent négativement (fig.69).

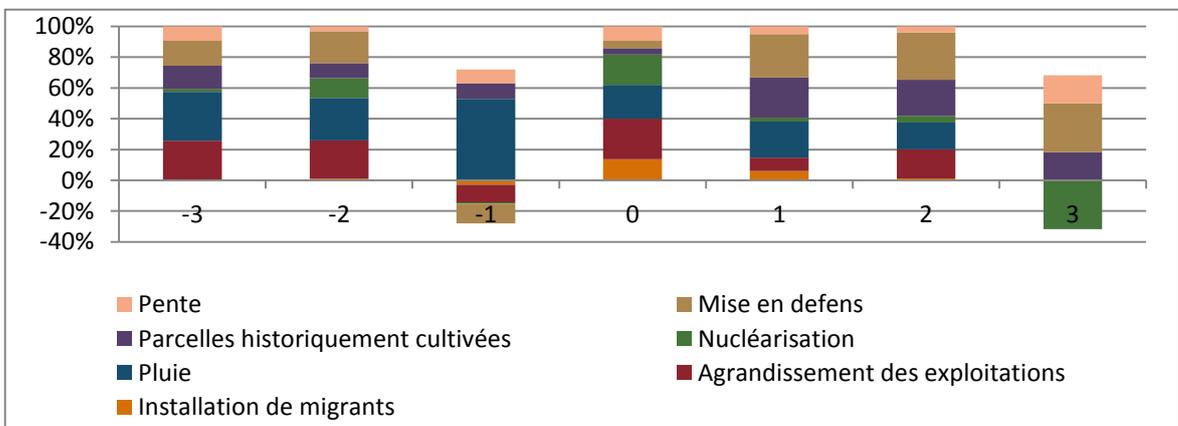


Figure 69: Contributions des différents facteurs aux classes.

Les moyennes des valeurs des facteurs varient beaucoup d'une classe à l'autre, et sont généralement ordonnées en fonction de l'intensité des tendances (tableau 15). Ainsi, on constate un gradient décroissant des tendances pluviométriques, des agrandissements des exploitations et des surfaces historiquement cultivées depuis la classe -3 vers la classe 3. Le facteur surfaces en défens est quant à lui croissant, atteignant ces valeurs les plus élevées dans les classes aux tendances de NDVI positives.

Table 15: Moyenne de différentes variables ou processus par classe de tendances.

Classes	Tendances de pluie	Surfaces en défens (ha)	Surfaces historiquement cultivées (ha)	Agrandissements des exploitations (ha)	Nucléarisations (ha)
-3	21.60	43.78	533.01	252.47	169.54
-2	21.23	22.30	470.13	214.29	184.13
-1	20.96	94.86	419.90	159.55	132.63
0	20.33	135.52	207.15	81.65	97.24
1	20.15	473.29	136.82	74.85	110.83
2	19.86	695.09	59.10	42.13	110.98
3	19.78	1550.65	15.50	13.68	56.22

La répartition inégale du poids de contribution des facteurs pour chaque classe nous permet d'esquisser une typologie des tendances de végétation en fonction des facteurs.

- i) **les tendances négatives de NDVI** se caractérisent par des défriches importantes, facilitées par l'absence de mise en défens et des tendances pluviométriques croissantes marquées. La présence importante de parcelles historiquement cultivées contribue en dernier lieu à expliquer ces tendances négatives.
La différence entre les classes de tendances -3 et -2 est très faible, et se constate pour l'essentiel au niveau du type de défriche et de surface historiquement cultivée. Les tendances les plus négatives sont le plus souvent celles qui sont effectuées par agrandissement des exploitations, le processus de nucléarisation contribuant à caractériser les tendances de classe -2. La classe -1 se démarque principalement des deux premières classes par la présence de fortes pentes, et donc de terrains accidentés non accessibles à la défriche.
- ii) **les tendances non significatives de NDVI** se démarquent par rapport à la première catégorie par la présence limitée de zones historiquement cultivées, et une représentation égale de tous les autres facteurs.
- iii) **les tendances positives de NDVI** se caractérisent majoritairement par la forte présence de zones en défens et de défriches limitées. Les tendances pluviométriques sont croissantes mais faibles par rapport aux autres classes, et l'augmentation du LAI est importante. La dernière classe (3), se démarque des deux autres par l'absence de phénomènes de défriche du fait qu'elle ne couvre que des surfaces en défens.

Cette typologie peut ensuite être spatialisée à l'aide de la carte agrégée des classes de tendances (figure 70). On constate une répartition Nord-Sud des classes de tendances, la plupart des zones en défens étant situées au sud de la zone. Cette répartition Nord-Sud explique aussi le gradient pluviométrique observé, et sa place prépondérante dans les facteurs explicatifs des différentes classes.

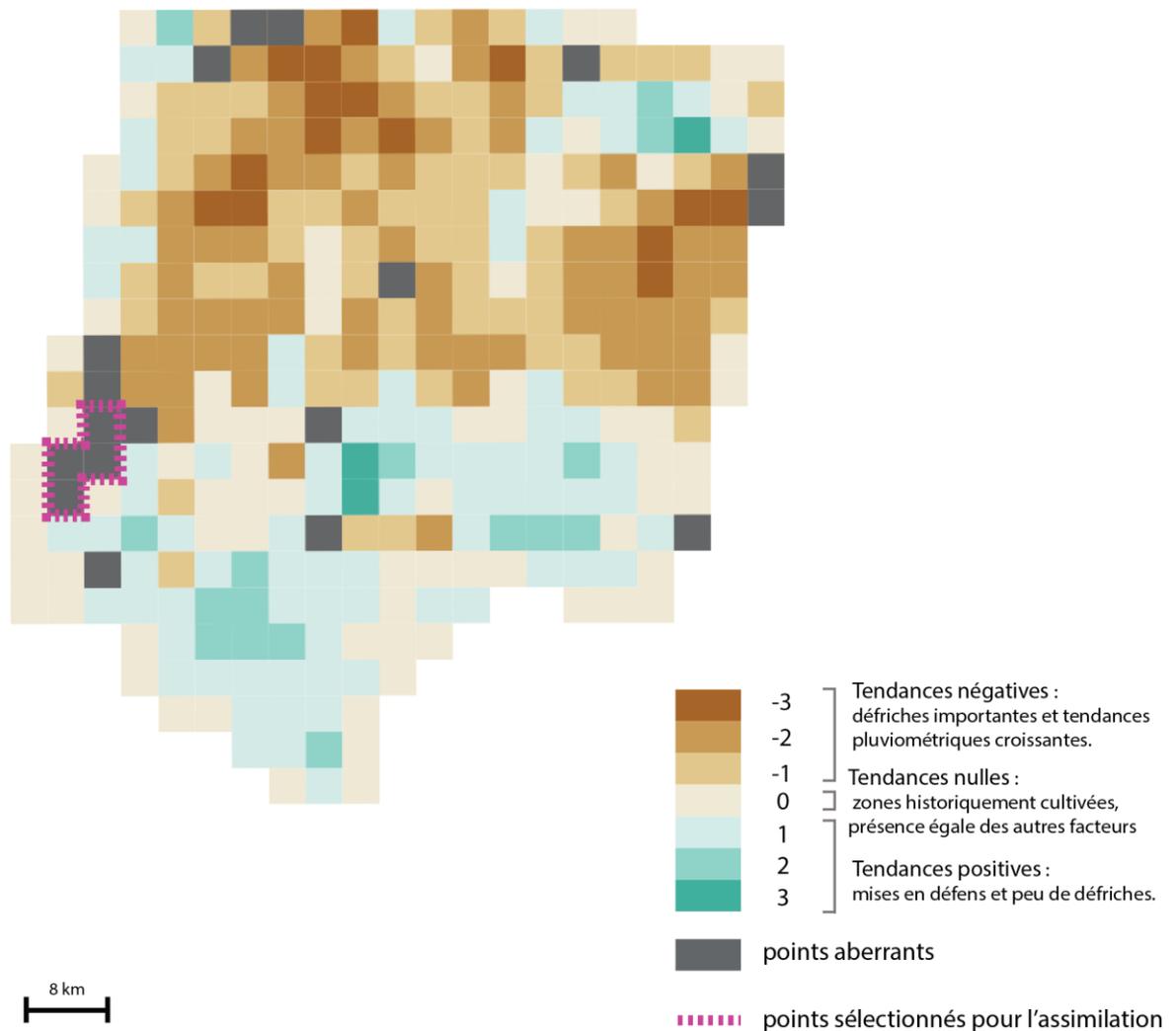


Figure 70: Répartition spatiale de la typologie de tendances.

1.5.3. Recalibration des points aberrants avec un exemple.

Cette partie présente les résultats de l'assimilation de données satellitaires dans le modèle, en prenant l'exemple de quatre points aberrants adjacents, situés au sud-ouest de la zone (figure 22). Ils appartiennent tous les quatre à la classe de tendances de NDVI 1. Ces points ont été classés comme aberrants à l'issue de la régression linéaire NDVI/défriches, ayant enregistré des tendances de défriches fortes (- 53, -56, -52 et - 40) à l'origine de résidus les plus élevés (respectivement -35.94, -39.63, -35.07 et -24.17).

La comparaison des facteurs et processus du modèle entrant en jeu pour ces quatre points avec les facteurs explicatifs de la classe de tendances 1 permet d'identifier les facteurs à l'origine de

cette divergence. Les défriches simulées sont majoritairement causées par le processus d'agrandissement des exploitations, les autres facteurs étant négligeables en comparaison. Pourtant, la classe 1 se caractérise par la diversité de ses facteurs et processus, d'importance globalement égale, les défriches étant limitées par la présence importante de terrains accidentés et de mises en défens (tab. 15). Il semble donc que le processus de défriche ait été surestimé par le modèle et les mises en défens sous-estimées.

Table 16: comparaison des facteurs à l'origine des simulations avec ceux de la typologie de tendances.

Mayenne des facteurs et processus modélisés	Moyenne des facteurs et processus de la classe 1
Agrandissements des exploitations = 346 ha	Agrandissements des exploitations = 74.85 ha
Nucléarisations = 273 ha	Nucléarisations = 111
Tendances pluie = 20.25	Tendances pluie = 20.15
surfaces en défens : 0 ha	Surfaces en défens : 473.29 ha

Seuls les processus de défriche peuvent être modifiés, la mise en défens étant une donnée d'entrée du modèle non remise en cause (les zones protégées sont connues et délimitées). Le modèle est relancé avec activation d'un paramètre limitant les phénomènes d'agrandissement des exploitations et de nucléarisation pour ces quatre cases, la surface d'agrandissement et d'installation de chacune des exploitations relevant de ces cases étant réduite de moitié. Les parcelles de ces quatre cases sont en même temps rendues moins accessibles dans le modèle pour les défriches. Les nouvelles tendances de surfaces défrichées obtenues pour ces quatre points sont alors de -17, -16, -17 et -16, abaissant les résidus à environ -3.6. L'assimilation effectuée a donc mené à des simulations plus proches des tendances de végétation issues des images MODIS.

1.6. Discussion

1.6.1. Entre tendances de NDVI et sorties du modèle, des coefficients de corrélation faibles mais néanmoins significatifs

Si les corrélations entre tendances de NDVI d'une part et tendances de LAI et de végétation naturelle d'autre part, se révèlent significatives le coefficient de corrélation est faible. Cela est assez peu surprenant compte tenu de la complexité des informations contenues dans un pixel au regard de la simplicité et de l'imprécision du modèle employé pour l'expliquer. Ainsi, le rayonnement - capté et traduit en pixel - reflète des signaux issus de la surface du sol en fonction de multiples facteurs provenant de toutes les échelles. Depuis le type de couverture de sol (eau, sol nu, culture, végétation naturelle) à l'état de cette couverture du sol (une culture victime de ravageurs ne renverra pas le même signal qu'une culture saine; de même, un sol riche en matière organique se différenciera d'un sol pauvre, etc.). Toutes ces données étant imbriquées sur une même surface et synthétisées en un seul pixel.

L'utilisation d'un modèle multiscalaire pour dénouer cette complexité s'avère donc indispensable, les informations contenues dans le pixel étant issues de processus et objets à

toutes les échelles. Mais, modéliser la réalité implique de la simplifier pour n'en garder que les facteurs déterminants et processus majeurs. Pour le modèle utilisé, un exemple de simplification réside dans la modélisation des surfaces défrichées. Si les trois processus identifiés (agrandissement des exploitations, nucléarisation et installation de migrants) sont clairement les principaux moteurs des défriches, un autre processus plus ponctuel est absent du modèle : les défriches dues à l'exploitation minière. En effet, la zone d'étude a vu se développer ces 15 dernières années une dizaine de sites miniers responsables d'importantes défriches très localisées. L'occultation de ce phénomène par le modèle a peu d'impact sur les dynamiques de défriche globales, mais engendre néanmoins des erreurs lorsque l'on compare les sorties du modèle aux tendances de NDVI sur les zones où se situent les mines.

Outre les omissions de certains processus, les sorties du modèle utilisées pour être comparées aux tendances de NDVI souffrent d'erreurs et d'imprécisions dans les données d'entrée du modèle (cf articles 1 et 2). Pour citer quelques exemples, les données pluviométriques TAMSAT présentent le désavantage d'atténuer l'intensité des pluies (Guillemot, 2016), les cartes des sols sont de résolution spatiale de l'ordre du km, les compositions des sols sont inconnues, les données de population issues des recensements sont d'ordre décennal, la limite des villages est floue, les limites de la végétation naturelle en 2000 (carte d'initialisation du modèle) sont peu précises et comportent des erreurs du fait qu'elles sont dérivées d'images Landsat à une résolution spatiale de 30 m., etc. Autant d'imprécisions en entrée du modèle sont responsables de biais lors des sorties.

Les trois indices de végétation simulés permettaient d'obtenir des tendances de végétation issues des trois principales composantes d'un paysage : la couverture du sol (évolution des surfaces en végétation naturelle), l'utilisation du sol (évolution des assolements) et la production du sol (évolution du LAI). Malgré toutes les erreurs et imprécisions listées plus haut, les corrélations sont significatives pour deux des indices de végétation simulés par le modèle : les tendances de LAI et les tendances de défriche.

Les tendances des proportions de maïs se sont révélées non corrélées aux tendances de NDVI, enlevant ainsi la possibilité d'inclure dans la suite de l'analyse les facteurs issus des dynamiques d'utilisation du sol de manière plus fine que par la seule dichotomie : cultures/végétation naturelle. Cette absence de corrélation est néanmoins tout à fait logique étant donné que les proportions du maïs dans les assolements ne sont spatialisées qu'au seul niveau de l'exploitation (allocation des cultures aux parcelles), et pas au-delà.

Par exemple, si une année donnée, une hausse des prix du coton engendre une baisse des surfaces en maïs, cette modification sera enregistrée pour tout le territoire, les prix n'étant pas spatialisés. Le seul aspect de spatialisation inclu dans le choix des assolements est lié à la pluviométrie : les agriculteurs peuvent être amenés à changer leurs assolements en cas de début tardif de saison des pluies. Les données pluviométriques étant spatialisées, les conséquences sur les assolements le seront aussi. Mais ce facteur a très peu joué durant ces 15 dernières années, le rendant négligeable (cf article 2). Les proportions de maïs évoluent donc globalement de la même manière pour toutes les cases de la grille, il est, à ce titre, logique de n'avoir trouvé aucune corrélation de variabilité spatiale des tendances NDVI/proportions de maïs.

Cette absence de spatialisation des stratégies d'assolement au niveau extra-exploitation enlève la possibilité de tester l'importance de facteurs non spatialisés sur les tendances de NDVI, comme les prix des cultures ou la promotion de culture via des « projets » ou des campagnes.

Une distribution spatiale des stratégies d'assolements à l'échelle extra-exploitation est pourtant visible sur le terrain. Deux facteurs se trouvent à son origine : d'une part la

répartition des espèces cultivées entre champs de brousse et champs de case, selon le type d'espèces cultivées, peut induire des zones où les parcelles de maïs sont plus denses, et d'autre part la répartition inégale des proportions de chaque type d'exploitation d'un village à l'autre va engendrer des stratégies d'assolement différentes en réponse à un facteur non spatialisé. Par exemple, un village ayant une importante proportion d'agro-éleveurs verra une augmentation plus forte de ses surfaces en coton (cf article 3) qu'un village contenant une majorité d'agriculteurs. La modélisation de telles dynamiques requiert un travail de terrain approfondi et une bonne connaissance des différents villages de la zone.

Pour finir, un moyen d'augmenter la corrélation aurait certainement consisté à utiliser une grille plus agrégée pour établir des comparaisons entre indicateurs de végétation. Mais cela aurait en même temps limité le nombre de points à étudier et donc conduit à une analyse moins fine des facteurs en jeu. Le risque aurait aussi été une réduction de la significativité statistique de l'analyse.

1.6.2. Quels processus sont derrière les tendances ?

Contrairement à ce que l'on attendrait, le modèle simule des tendances de LAI inverses de celles des pluies, les pentes des pluies les moins importantes correspondent aux tendances croissantes de LAI les plus marquées. Les tendances des pluies prennent uniquement en compte la moyenne des pluies, alors que le modèle se base sur leur répartition durant la saison, ce qui pourrait expliquer cette apparente contradiction : une saison où les épisodes pluvieux sont forts mais ponctuels aura pour conséquence des surfaces foliaires moins développées que si la pluie avait été plus faible mais mieux répartie (Kouressy et al., 2008). Cela a pour conséquence - plus logique - une corrélation entre l'augmentation de la surface foliaire et celle des indices de végétation. Il aurait en outre été intéressant dans cette étude de relier le LAI au rayonnement, ce dernier pouvant mieux expliquer les valeurs de LAI dans les situations où les variabilités de pluie sont faibles.

Malgré l'importante déforestation ayant eu lieu ces 15 dernières années, pour ce qui concerne plus d'un quart du territoire (cf article 3), il semble à première vue que le facteur climatique tienne le premier rôle dans l'explication des tendances de NDVI. Cependant, la prédominance de la pluviométrie dans les facteurs explicatifs des tendances de végétation est curieuse compte tenu du fait que les tendances de NDVI présentaient une bien meilleure corrélation avec les tendances de végétation naturelle qu'avec les tendances de LAI.

Une explication réside dans le choix du nombre de facteurs utilisés dans Random Forest pour représenter les deux indices de végétation simulés : alors que les tendances de LAI ne sont expliqués que par les facteurs climatiques et pédologiques, les tendances de végétation naturelle sont issues d'une combinaison de 6 processus et facteurs, i.e. l'agrandissement des exploitations, l'installation de migrants, la nucléarisation, les mises en défens, les zones historiquement cultivées et les terrains accidentés. Indépendamment, chacun de ces facteurs représente un poids limité pour expliquer les tendances de NDVI, mais les facteurs de mise en défens et d'agrandissement des exploitations représentent à eux deux plus de 35% de l'importance des facteurs explicatifs (contre 30 pour la pluie). Les facteurs responsables des défriches ont donc au final un poids plus important que le facteur climatique pour expliquer les tendances de NDVI.

Un autre détail posant question réside dans la présence inégale de différents processus de défriche dans les classes de tendances NDVI. En effet, les zones aux tendances de NDVI très négatives (classes -3) sont caractérisées par des défriches issues de processus d'agrandissement des exploitations alors que la classe -2 se distingue par la contribution de la nucléarisation dans ses facteurs explicatifs. Les processus d'installation de migrants se retrouvent dans les classes 0 et 1. Une interprétation pourrait consister à dire que les manières de défricher (processus spatiaux, surfaces moyennes par exploitation) sont différentes selon qu'elles sont faites par agrandissement d'exploitations ou par installation de migrants. Cette explication peut être plausible (moins de terres sont données au migrants, les défriches sont moins fragmentées) mais la réalité semble néanmoins plus complexe. En effet, une hypothèse plus crédible est liée à l'environnement requis pour défricher selon les différents types d'acteurs : les défriches issues d'agrandissement des exploitations se font généralement dans les zones peuplées, non loin des exploitations existantes. Au contraire, les migrants sont installés la plupart du temps sur des terres vierges, à l'écart des terres cultivées par le village hôte. Un pixel recouvrant une zone de défriches par agrandissement aura donc de fortes chances de contenir aussi des signaux dus à la présence de parcelles cultivées depuis longtemps, alors que les zones d'installation de migrants conduiront à un pixel contenant plus de terres vierges et cuirasses. Les deux types de défriche seront donc rangés dans des classes différentes de tendances de NDVI.

Concernant les classes d'augmentation du NDVI (2 et 3), elles sont visiblement corrélées à un regain de végétation. Il est intéressant de noter l'importance du facteur « mise en défens » qui discrimine ces zones de regain de végétation par rapport aux autres. La grande majorité des zones ayant connu un regain de végétation sont celles qui sont protégées de l'action humaine, toutes les autres sont marquées par des tendances négatives de NDVI.

Cet effet anthropique est perceptible de deux manières dans le facteur « cultures historiques », liée aux tendances négatives de NDVI. Tout d'abord, ce facteur est associée aux zones où les défriches sont fortes, indiquant un processus de défriche à proximité des villages et des anciennes parcelles de l'exploitation. Cette variable fortement corrélée aux tendances négatives de NDVI peut aussi indiquer une tendance de perte de fertilité des sols. En effet, ces 15 dernières années sont caractérisées par une diminution de la pratique de la jachère et une augmentation des doses de fertilisants et herbicides menant à un épuisement progressif des sols et donc à une diminution progressive des surfaces foliaires moyennes. Le modèle ne prend pas en compte cet effet d'épuisement des sols, les tendances des surfaces foliaires ne dépendant que du climat, de la nature du sol et des pratiques culturelles. Cependant, la forte corrélation entre zones historiquement cultivées et tendances décroissantes de végétation permet d'émettre l'hypothèse d'un effet sous-jacent d'épuisement des sols, déjà démontré par ailleurs dans d'autres zones d'Afrique de l'Ouest (Mahaman et al., 2001 ; Hiernaux et al., 2009).

1.6.3. Détection de processus anthropiques dans les images de télédétection

L'innovation présentée dans cette étude concerne la détection explicite de processus d'origine anthropique dans les images de télédétection, de manière systématique. Plusieurs études ont contribué à expliquer les tendances de végétation visibles sur les images mais la majorité se limite aux facteurs explicatifs de type biologique et parfois ajoute un facteur d'occupation du

sol (Ibrahim et al., 2012 ; Zhu et al., 2016 ; Fensholt et al., 2013 ; Cho et al., 2015). Les facteurs humains sont souvent abordés de manière empirique ou via des indicateurs socio-économiques (Seaquist et al., 2009 ; Kaptué Tchuenté et al., 2015 ; Wessels et al., 2007 ; Brandt et al., 2016).

Prenons l'exemple du travail réalisé par Leroux et al., dans la continuité duquel s'inscrit cet article, qui consistait en partie à identifier les facteurs ayant une influence sur les tendances de NDVI, dans le cadre d'une zone d'étude au Niger. Les facteurs testés étaient de type biologique (pluviométrie) et socio-économique (distance aux villages, distance aux marchés, données démographiques etc.). Une corrélation avait par exemple été trouvée entre distance aux villages et tendance de NDVI. Cette corrélation avait donné lieu à plusieurs hypothèses explicatives, mais les processus sous-jacents n'étaient pas explicitement présents dans l'analyse. Notre approche permet d'aller plus loin en détection des effets anthropiques dans les images satellitaires puisqu'elle utilise la modélisation de processus explicites. Prenons l'exemple des défriches par agrandissement, un facteur non explicite serait par exemple la densité des exploitations dans une zone qui serait liée à des tendances négatives de NDVI. Le fait d'utiliser le processus simulé par le modèle permet d'une part d'identifier directement le processus responsable de la diminution des tendances de NDVI et d'autre part d'avoir accès à toutes les relations de cause à effet ayant abouti au processus en question ; par exemple la moyenne de surface agrandie par exploitation, le nombre d'exploitations concernées, etc.

1.6.4. Assimilation d'images satellitaires dans un modèle de dynamiques des agroécosystèmes

La seconde innovation présentée dans cet article est la réalisation d'une assimilation d'images satellitaires dans un modèle de dynamiques des agroécosystèmes.

L'assimilation réalisée est basée sur deux hypothèses fortes. La première postule que tous les facteurs explicatifs des tendances de végétation sont dans le modèle. En effet, la démarche consiste à considérer que les points aberrants dérivent d'un mauvais paramétrage du modèle et non pas d'un processus non pris en compte dans le modèle. Par exemple, la comparaison des points aberrants avec les typologies de tendances de NDVI ont montré une surestimation des défriches par agrandissement des exploitations. La divergence entre les valeurs simulées et celles issues des images aurait tout aussi bien pu être due à la présence d'une activité minière dans ces zones, non prise en compte dans le modèle.

Cette assimilation est aussi construite sur l'hypothèse que la moyenne des tendances de NDVI suffit pour retrouver les processus sous-jacents aux tendances de végétation. Si certains processus aboutissent en effet à des tendances de végétation spécifiques et différenciées (par exemple défriches par agrandissement *vs* mise en défens), d'autres ont des effets proches sur la végétation (comme les défriches par nucléarisation et les défriches par agrandissement) et leur identification gagnerait à être étayée par d'autres indicateurs que la seule moyenne des tendances de NDVI. Il pourrait être intéressant de développer et de tester d'autres métriques pour caractériser l'évolution de végétation par zone, en se basant par exemple sur les indicateurs paysagers. En plus de l'utilisation de la moyenne des tendances de NDVI, nous pourrions aussi imaginer caractériser chaque case de la grille par un indice de fragmentation des classes de NDVI, la variance des tendances de NDVI, un indice de forme des classes de NDVI, etc. Une combinaison de tous ces indices aboutirait certainement à une typologie plus fine des tendances de NDVI.

Des études doivent maintenant être menées pour approfondir ces deux points soulevés, l'objectif du présent article, concernant cette partie, étant seulement de tester les possibilités d'assimilation d'images satellitaires dans des modèles de dynamiques des agroécosystèmes. L'assimilation a consisté à utiliser l'information d'une image MODIS pour modifier un paramètre du modèle dans le but d'améliorer les capacités du modèle à reproduire les dynamiques paysagères de manière fiable. Si ce type d'approche est couramment utilisé pour les modèles de culture à travers le monde (Morel et al., 2014 ; Wit et al. 2012 ; Chahbi et al., 2014), il n'a à notre connaissance encore jamais été appliqué à des modèles de dynamiques des agroécosystèmes. La présente étude, par l'exemple du réétalonnage des quatre points aberrants, constitue un premier pas dans ce sens et démontre qu'une telle démarche est possible.

1.7. Conclusion

Le travail réalisé a abouti à deux innovations concernant les liens entre modèles de dynamiques des agroécosystèmes et données satellitaires. Il a d'abord montré qu'il est possible de détecter de manière explicite des processus anthropiques dans les images de télédétection, à l'aide de modèles de dynamiques des agroécosystèmes. L'empreinte des processus de défriche dans les séries temporelles d'images MODIS de la province du Tuy a ainsi pu être identifiée.

Ce premier résultat a permis de réaliser la seconde innovation présentée dans cet article : l'assimilation de données satellitaires dans un modèle de dynamiques des agroécosystèmes.

Ce premier jalon vers l'assimilation a des implications fortes et ouvre le champ des possibles pour de nombreuses applications : les modèles pourraient inclure dans leur paramétrage des valeurs directement issues des images satellitaires ou utiliser de manière systématique l'information satellitaire pour réajuster leur processus. Cela permettrait aussi de réaliser des scénarios prospectifs plus fiables et de réduire les phénomènes de propagation d'erreurs lorsque le modèle est lancé sur de nombreuses années.

D'autres travaux sont maintenant requis pour approfondir les voies proposées par cette étude, et notamment pour développer une méthode d'assimilation plus systématique, générique et reproductible, l'exemple présenté ne concernant que quelques points et n'étant pas automatisé.

Conclusion



Conclusion

Nous avons exploré dans cette thèse de nouvelles méthodes de suivi prospectif des mutations agraires, dans le contexte difficile des menaces d'insécurité alimentaire des pays d'Afrique de l'Ouest dont les campagnes sont en pleine mutation et dont la démographie explose. Plus précisément, cette thèse s'est intéressée à trois sous-objectifs concernant respectivement les méthodes de modélisation des dynamiques agraires, la compréhension de ces dynamiques passées et l'appréhension de leurs possibles évolutions, les liens pouvant être faits entre les modèles de dynamiques des agroécosystèmes et l'information satellitaire.

Cette dernière partie s'attache, dans un premier temps, à récapituler les principaux résultats des travaux de thèse et leurs contributions aux différents domaines liés aux objectifs de recherche. Un second paragraphe présente des enseignements tirés des diverses difficultés rencontrées au cours du travail, que nous considérons comme autant de contributions supplémentaires. Enfin, cette thèse ouvre de nombreuses perspectives en matière de recherches ou d'applications, qui sont présentées en dernière partie.

Contributions de la thèse

Les contributions méthodologiques :

- *Dans le domaine de la modélisation des dynamiques des agroécosystèmes*

En 2013, le National Research Council identifiait les grands enjeux des modèles de dynamiques des agroécosystèmes. Le croisement d'échelles était cité en tête de liste et identifié comme l'une des problématiques majeures dans ce domaine. Il était séparé en deux points à améliorer : le croisement d'échelles à opérer au sein des modèles de changement d'occupation du sol et le croisement d'échelles entre modèles de changement d'occupation du sol et d'autres modèles du système terrestre.

La thèse propose une réponse à ces deux points en développant une **méthode originale de transfert d'échelles à l'aide de graphes d'interaction**. Le modèle développé imbrique des éléments et processus issus de différentes échelles, allant de la culture à la région. Les exemples développés ont montré qu'il est possible avec un tel modèle d'observer, à une échelle donnée, les effets issus de processus ayant lieu à plusieurs autres échelles. Ce transfert d'échelles est en outre réalisable dans les deux sens, de façon à ce qu'il soit possible d'identifier l'impact d'un élément issu d'une échelle inférieure sur une échelle supérieure et vice versa. De cette manière, le modèle développé apporte une réponse valable à la problématique du croisement d'échelles, au sein d'un modèle de changement d'occupation du sol.

Le deuxième point, qui concerne l'intégration de modèles du système terrestre, est abordé par **l'intégration d'un modèle de culture dans le modèle plus général de dynamiques des agroécosystèmes**. Cette intégration permet de lier des processus biologiques ayant lieu à l'échelle de la parcelle, à d'autres processus impliqués dans les dynamiques de changement de couverture de sols, au niveau de l'exploitation, à l'échelle du village, de la zone agro-climatique et de la région. L'utilisation et l'occupation du sol peuvent ainsi être liées à la production du sol. L'autre implication de cette intégration du modèle de culture est la possibilité de réaliser la **spatialisation d'un modèle de culture**, sans avoir recours aux méthodes d'agrégation ou de désagrégation qui entraînent souvent une déformation de l'information.

Le croisement d'échelles réalisé ici nous laisse imaginer une nouvelle manière d'aborder la modélisation des dynamiques des agroécosystèmes. En effet, Agarwal et al. proposaient en 2002 une méthode pour classer les modèles de dynamiques des agroécosystèmes, reconnue et régulièrement utilisée par la communauté des modélisateurs. Dans cette approche, les modèles sont classés selon leur représentation des trois dimensions, spatiale, temporelle et décisionnelle. Chacune de ces dimensions présente des niveaux de complexité qui caractérisent les modèles. Par exemple, un modèle considéré comme ayant une forte complexité spatiale aura une représentation fine des éléments spatiaux, en prenant en compte leurs trois dimensions et les relations de voisinage. Au contraire, une faible complexité spatiale sera attribuée aux modèles dont les données sont peu ou pas spatialisées.

Avec les nouvelles perspectives offertes par les travaux de cette thèse, conjointement à ceux d'autres équipes visant à intégrer plusieurs échelles dans leurs modèles (Blazy et al., 2015; Chopin et al., 2015; Houet et al., 2014), nous pourrions imaginer ajouter une quatrième dimension de classement des modèles qui serait la complexité scalaire. Elle serait faible pour les modèles ne faisant intervenir qu'une échelle, moyenne pour ceux ayant recours à des procédés de couplage de modèles ou à des méthodes d'agrégation, en vue d'effectuer un croisement d'échelles, et élevée pour ceux qui intègrent plusieurs échelles sans déformation de l'information.

- *Pour l'amélioration des liens entre télédétection et modèles de dynamiques des agroécosystèmes*

Aujourd'hui, très peu de liens sont faits entre les modèles de dynamiques des agroécosystèmes et les images de télédétection. Les premiers décortiquent pourtant les processus de changement dans l'utilisation et l'occupation des sols, indentifiables et quantifiables grâce aux secondes.

À ce jour, les liens entre modèles de dynamiques des agroécosystèmes et télédétection se limitent à des forçages pour décrire l'état initial et des comparaisons pour les phases de calibration et de validation du modèle.

La difficulté rencontrée par les modèles de dynamiques des agroécosystèmes, lors du croisement d'échelles, était jusqu'ici un frein à cette intégration. Chaque pixel cumulant de manière indifférenciée des signaux issus d'objets situés à des échelles différentes, les modèles ne parvenaient pas à représenter cette information multiscalaire et ne prenaient donc pas en compte tous les processus en jeu. La réalisation du croisement d'échelles présentée en

première partie de la thèse permet dorénavant d'aborder ces liens entre télédétection et modélisation des dynamiques des agroécosystèmes.

L'amélioration de l'identification de l'empreinte de processus anthropiques dans les données satellitaires constitue ainsi une première contribution apportée par les travaux de cette thèse : les résultats obtenus ayant permis d'élaborer une typologie des tendances de végétation en fonction de processus et facteurs issus d'un modèle de dynamiques des agroécosystèmes.

La seconde contribution consiste en la réalisation d'**une assimilation de données satellitaires dans un modèle de dynamiques des agroécosystèmes**, en s'inspirant des travaux réalisés pour les modèles de culture. Si la thèse ne présente qu'un unique exemple d'une telle entreprise, elle contribue néanmoins à démontrer que ce type de démarche est possible.

Les contributions thématiques :

L'étude des mutations agraires de la province du Tuy est essentielle à la compréhension de l'accélération récemment observée dans l'évolution des paysages, ainsi qu'à l'anticipation des changements possibles à venir. De nombreuses études existent à ce sujet, identifiant et décrivant les principales dynamiques agraires, toutes principalement basées sur des travaux d'enquêtes de terrain (e.g. Augusseau, 2007; Bainville and Dufumier, 2009; Caillault et al., 2012; Diallo and Vall, 2010; Serpantié, 2003; Vall et al., 2006; Savonnet-Guyot, 1986 ; Tallet, 2007). L'objectif de la thèse était moins, ici, de mener une étude supplémentaire des dynamiques de la zone, que de s'appuyer sur les différents travaux existants, dans le but de les approfondir via l'utilisation du modèle ; l'étude de terrain consistant surtout à compléter les zones d'ombre de ces travaux.

De ce fait, une première contribution de la thèse réside dans la **validation et quantification des phénomènes observés dans les études existantes**. En effet, si les facteurs des dynamiques ont été identifiés et décrits dans ces travaux, la quantification de certains processus était limitée car difficile à réaliser à partir d'études de terrain, demandant un travail long et détaillé. Le fait d'avoir traduit ces processus en modèle a permis d'une part d'appuyer les différentes études de terrain en montrant que les dynamiques simulées étaient capables de reproduire de manière fiable les évolutions de paysages ayant eu lieu ; et d'autre part de quantifier, ou du moins d'estimer les ordres de grandeurs de certains processus dont l'appréhension n'avait été jusque-là que qualitative. Ainsi, le poids des différents processus engendrant les dynamiques de défriche a pu, par exemple, être estimé.

Une seconde contribution documente **l'apport de nouvelles connaissances sur les processus de prise de décision pour l'assolement dans la province du Tuy et leurs facteurs déterminants**, sujet qui avait jusque-là été peu étudié pour cette zone (article 3). Outre l'identification formelle des différents facteurs déterminants et la quantification de leur poids respectifs dans le processus de décision, l'approche développée qui consiste à hiérarchiser les règles de décision en fonction des objectifs est originale et constitue ainsi un apport dans le domaine plus général de l'étude des prises de décision.

Une troisième contribution réside dans **l'exploration de voies de développement et la quantification de leurs effets potentiels**, via la simulation de scénarios prospectifs (article 2). Si ces différentes voies ne sont pas nouvelles, l'utilisation du modèle a permis d'en mesurer les conséquences, offrant ainsi une connaissance plus concrète et explicite des divers scénarios d'évolution. La thèse a ici contribué à ajouter des éléments au débat récurrent sur les modèles d'agriculture qu'il convient de promouvoir pour les années à venir, en soulignant la pertinence de l'approche que propose l'agro-écologie pour répondre aux futurs enjeux.

Enfin, la **problématique des relations contractuelles entre exploitations paysannes et entreprise de transformation** a été abordée en filigrane tout au long de cette thèse. Les trois premiers articles ont évoqué et analysé certains aspects de la question du rôle de la filière cotonnière dans les dynamiques de la zone.

Si la stratégie de fidélisation de l'entreprise, la culture du coton en échange de crédit pour les intrants, est connue et déjà documentée (Guenot et Huchet-Bourdon, 2014), l'utilisation du modèle a permis d'évaluer l'importance de ce contrat dans le processus décisionnel des agriculteurs

- (1) en quantifiant les productions supplémentaires de maïs qu'il permettait, en termes de calories supplémentaires produites dans la zone (article 1).
- (2) en calculant le poids du contrat dans le choix des assolements cultureux (article 3). L'article 3 a aussi contribué à replacer les stratégies incitatives de l'entreprise au sein du processus décisionnel des agriculteurs en montrant qu'une partie de ces stratégies interviennent lors de la phase de construction des assolements en fonction des objectifs primaires de sécurité alimentaire.
- (3) en discutant de son rôle, par le passé, dans les processus de défriche, ainsi que de la possibilité, pour les agriculteurs, de ne plus y avoir recours, dans le futur (article 2). Si les effets bénéfiques de la culture du coton sur l'augmentation du niveau de vie, pour la période 1980 à 2000, ont été relevés dans la littérature, l'article 2 a discuté des limites des systèmes de culture à base de coton pour la période étudiée. La généralisation de la culture du coton est pour beaucoup à l'origine de la diminution des surfaces en végétation naturelle, et son maintien dans le futur pose des questions quant à la durabilité des systèmes de production en place.

Un apport de la thèse par rapport à cette thématique des liens entre agriculture paysanne et entreprise est l'utilisation de la modélisation pour explorer ces relations. Jusqu'alors, la plupart des études traitant de ce sujet développaient une approche qualitative pour caractériser la nature des relations entre petites exploitations et entreprises. La thèse a démontré que la modélisation s'avère être un outil utile qui permet une approche quantitative de ces relations.

Enseignements tirés des limites rencontrées

Comme la grande majorité des travaux de recherche, cette thèse a consisté à tester de nouvelles méthodes et domaines encore peu connus. L'aspect exploratoire est donc central, et comme tout tâtonnement, il a conduit à rencontrer des limites à certaines approches ou, parfois, à infirmer des hypothèses. Les difficultés et obstacles rencontrés n'étant pas

considérés comme un résultat attendu, leurs enseignements et conclusions n'ont pas - ou peu - été traités dans les articles. Ce paragraphe s'attache à énumérer les principaux enseignements auxquels ont conduit ces fausses pistes, qui constituent aussi, à leur manière, des apports à cette thèse.

Concernant le modèle développé et la plateforme de modélisation

Lorsque ce travail de thèse a démarré, la plateforme de modélisation Ocelet avait quelques années, et est à ce jour encore en cours de développement. Le modèle auquel a abouti cette thèse, de par son croisement d'échelles et la complexité de son architecture, a permis d'éprouver la plateforme sur certains aspects et de tirer des conclusions concernant sa manipulation pour les prochains projets.

Le modèle a ainsi permis de tester les limites de taille des fichiers utilisables avec Ocelet. Ainsi les deux shapefiles des entités parcelle et champ, contenant respectivement 200 000 et 400 000 polygones se sont avérés dépasser les tailles gérables par le modèle. Un découpage en 5 planches a permis de résoudre le problème, le modèle requérant environ 3 heures pour charger et transformer chaque planche en entité. Ce contretemps a été l'occasion d'affiner la question du **choix des datafacers à intégrer, pour des travaux ultérieurs avec un ordinateur moyen** (16 Go de RAM).

D'autre part, si Ocelet a fait la preuve de sa performance en rendant possible le croisement d'échelles dans le modèle développé, une complexité inhérente en est la contrepartie. Dans sa version finale, le nombre important de paramètres et de processus entremêlés a gêné la manipulation du modèle. De simples tests de sensibilité, concernant un processus particulier, devenant laborieux du fait de l'imbrication des échelles et rendant difficile l'entreprise de n'isoler qu'un seul des éléments. Cela pose la question de **comment améliorer la manipulation d'un modèle qui devient complexe**.

Concernant l'utilisation des zonages en télédétection, pour faire le lien avec les modèles

Le dernier article, qui concerne les liens entre télédétection et modèles de dynamiques des agroécosystèmes, est certainement la partie la plus exploratoire de la thèse. Avant d'obtenir les résultats présentés, une première méthodologie avait été mise en place, qui n'avait pas abouti à des résultats satisfaisants. Les conclusions tirées de ce premier essai nous paraissent assez pertinentes pour être évoquées dans cette partie.

Plutôt que d'utiliser une grille comme support de nos analyses, nous avons pensé avoir recours à une méthode de zonage (Bisquert et al., 2014). L'hypothèse étant que le zonage permettrait de créer des unités de tendances cohérentes et mettrait ainsi en évidence des zones de dynamiques différentes.

Les tendances de NDVI ont donc été regroupées en zones homogènes, par le biais d'une segmentation sur le logiciel e-cognition (travail réalisé par Beatriz Bellon). Les variables issues du modèle (LAI, défriches, proportions de maïs) étant ensuite agrégées sur ces mêmes zones.

Contrairement à ce que nous attendions, les tests de corrélation n'ont pas été significatifs, aucune tendance n'est apparue dans les régressions linéaires. Une revisite des données testées a permis d'apporter une explication à ce résultat. Si le modèle reproduit les tendances observées de manière fiable, la représentation spatiale des tendances simulées est parfois un peu décalée par rapport aux tendances visibles sur les images satellitaires, du fait d'une imprécision dans la simulation de certains processus. Ce léger décalage que l'on retrouve à certains endroits est lié à l'imprécision des données d'entrée du modèle et à la difficulté de reproduire fidèlement une réalité complexe (des défriches pourront par exemple être simulées un peu au Nord d'une zone effectivement défrichée). Le zonage qui conduit à délimiter très précisément des objets n'est donc pas assez souple pour intégrer ce décalage spatial ponctuel, contrairement aux grilles d'analyse finalement utilisées.

Cette première méthodologie a conduit à **envisager pour la suite des manières de contourner ce problème** (par exemple en produisant un second zonage à partir des sorties du modèle et en comparant les deux zonages obtenus).

Concernant l'approche transdisciplinaire

Une des particularités revendiquées de cette thèse est son aspect transdisciplinaire, s'inscrivant ainsi dans les tendances actuelles de décloisonnement des savoirs et de promotion des échanges entre les différents domaines scientifiques pour accéder à une approche plus globale des problématiques. Ainsi, la thèse se situe au carrefour de la modélisation, des sciences agronomiques, des sciences géographiques et de la télédétection, en mêlant algorithmique, programmation informatique, études de terrain, traitement d'images satellitaires, biologie végétale, sociologie, etc.

Si cette approche nous paraît aujourd'hui nécessaire, elle engendre certaines frustrations dues à l'impossibilité d'approfondir certains axes. Cette thèse nous a donc permis de **tester certaines limites dans l'intégration de différentes disciplines entre elles**. Par exemple, si elle a permis d'explorer les liens entre modélisation et études de terrain, elle en a aussi révélé certaines incompatibilités. Les études de terrain ont permis de définir les règles traduites dans le modèle, et le modèle a permis de valider et de renforcer la crédibilité accordée aux analyses issues des enquêtes de terrain. Mais, le passage par le modèle a aussi conduit à la simplification de certaines analyses issues des enquêtes, en contraignant certains processus observés pour les rendre compatibles avec les besoins informatiques. Ainsi, les études de terrain avaient abouti à une analyse des relations entre villages, plus fine que celle permise par le modèle (article 2). Les conclusions de l'étude concernaient les transactions de terres entre villages et montraient que ces dernières dépendaient en grande partie de la position hiérarchique du village, liée à son ancienneté. Mais ce type de relations n'a pas pu être modélisé car trop fin pour le modèle et requérant par ailleurs une connaissance exhaustive de l'importance hiérarchique de tous les villages de la zone, ainsi que de leurs frontières précises.

Perspectives de la thèse

Perspectives de recherche

- *Aspects à approfondir en modélisation*

La réécriture du modèle de culture SARRA-H en Ocelet pour l'intégrer au modèle de cette thèse a permis d'obtenir la simulation du développement des cultures de maïs, sorgho et mil. Une prochaine étape serait d'étendre cette simulation aux autres principales cultures de la zone, notamment le coton et le sésame. Cela permettrait d'une part de modéliser plus finement les dynamiques de l'exploitation agricole en connaissant le volume de production des céréales et des cultures de rente et d'autre part de prendre en compte la simulation de leur LAI pour pouvoir le comparer aux images de télédétection, sans être contraint de se fier uniquement au LAI simulé pour les céréales (article 4).

Notons que le recodage de Sarra-H en Ocelet a déjà donné lieu à des travaux supplémentaires. Ainsi, Castets (2015) est reparti du script développé pour construire un modèle de prévision des productions céréalières à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, en utilisant des données climatiques et pédologiques sous forme de rasters en entrée du modèle. Le modèle qu'il a ainsi développé est aujourd'hui utilisé pour les bulletins d'alerte du système d'alerte précoce AGRHYMET.

D'autres aspects du modèle n'ont été abordés que de manière superficielle pour cette thèse et pourraient être approfondis. C'est le cas de la dimension économique du fonctionnement des exploitations. Si l'influence des prix est prise en compte dans les stratégies d'assolement (article 3), l'estimation de la valeur ajoutée produite et des revenus dérivés est essentielle pour aller plus loin dans l'analyse des stratégies des agriculteurs. En effet, c'est elle qui détermine, pour beaucoup, les choix faits au niveau de l'exploitation. L'intégration de cette dimension économique des exploitations requerrait néanmoins de détailler beaucoup plus la structure interne de celles-ci (équipements, infrastructures) ainsi que les itinéraires techniques appliqués et le travail ouvrier rémunéré, pour pouvoir estimer les amortissements, les consommations intermédiaires et les salaires. Des diagnostics et bases de données déjà existants (Bernier, 2009 ; base de donnée ASAP) peuvent d'ores et déjà servir de support pour construire les règles à intégrer dans le modèle.

De même, l'article 4 a souligné l'importance de reproduire dans le modèle la répartition spatiale des différents types d'agriculteurs, qui sont pour l'instant également répartis sur le territoire. Cet aspect peut facilement être ajouté au modèle et ouvre des perspectives d'analyse des tendances satellitaires en relation avec les informations simulées, ajoutant les facteurs non spatialisés dans cette étude (prix, campagnes de promotion, politiques publiques...).

Enfin, les différents travaux ont mis en évidence deux points cruciaux dans la compréhension des dynamiques de l'agroécosystème, absents ou sous-représentés dans le modèle auquel cette thèse a abouti. Le premier grand absent est l'activité d'élevage. Cette prise en compte permettrait d'une part d'affiner l'aspect économique des exploitations, les choix des itinéraires techniques, la représentation de la fertilité des sols, les choix tactiques et stratégiques des agriculteurs et d'autre part de représenter la scission du territoire entre zones dédiées à l'élevage (parcours, pâturages...) et domaine cultivé, ouvrant le champ à l'analyse des relations de plus en plus conflictuelles entre agriculteurs et éleveurs.

Le dernier aspect manquant, pourtant abordé dans tous les articles, est la prise en compte de l'évolution des propriétés du sol. Ce point peut, lui aussi, être facilement implémenté, il suffirait de créer une propriété « fertilité » à l'entité parcelle et de la faire évoluer en fonction des antécédents culturels et des itinéraires techniques. Cela permettrait d'étendre les analyses et d'aborder la problématique d'épuisement des sols, de manière explicite.

- *Extension du modèle à d'autres zones et d'autres thématiques*

Dans la continuité directe de cette thèse, la question de l'extension de la zone couverte par le modèle est à envisager. En effet, pouvoir utiliser le modèle au niveau national ouvrirait des perspectives de recherche intéressantes en permettant l'analyse des relations entre régions et en fournissant des indicateurs simulés, susceptibles de servir d'appui aux décisions prises à l'échelle nationale. Cette extension est un programme de recherche à part entière car elle pose la question de la généralité des processus décrits et requiert une échelle d'analyse supplémentaire, permettant d'intégrer les processus transrégionaux.

Cette extension pourrait aussi être envisagée à d'autres régions du monde présentant des dynamiques similaires. Le modèle offre alors un outil précieux dans une perspective d'analyse comparée, pouvant fournir les mêmes types d'indicateurs pour plusieurs régions et permettant ainsi de déterminer la généralité des processus analysés.

Les thématiques abordées pourraient elles aussi être élargies, avec notamment l'intégration des dynamiques urbaines, et particulièrement des relations ville-campagne. Ces relations ont été rapidement évoquées dans l'article 2 concernant les possibilités d'émigration vers les villes, et jouent un rôle important dans les dynamiques de la province de Tuy, notamment par sa proximité avec Bobo-Dioulasso et sa position sur l'axe Ouagadougou-Bobo Dioulasso.

- *Développement de l'utilisation croisée de la télédétection et des modèles paysagers*

Le dernier article a ouvert le champ à de multiples travaux potentiels, dans le sens d'une meilleure intégration des modèles d'agroécosystème et de télédétection.

Dans la continuité directe des travaux présentés dans l'article 4, nous pouvons imaginer une étude plus poussée sur la détection des processus anthropiques et biologiques dans les images. Cela consisterait à diversifier les indices paysagers extraits des données satellitaires ainsi que ceux du modèle. Par exemple, les tendances d'évolution de la surface foliaire maximale ne sont pour l'instant représentées que par le facteur climatique, alors que le modèle détaille tous les processus à l'origine de telles tendances, fournissant ainsi une multitude d'indicateurs qui pourraient être utilisés. Nous pourrions aussi imaginer la réalisation de masques des images sur lesquels relancer Random Forest, ce qui permettrait d'avoir une connaissance plus fine des différents facteurs impliqués dans les dynamiques spatiales d'une zone spécifique et d'éviter que les dynamiques de ces zones ne soient bruitées par des processus beaucoup plus importants ayant lieu dans les autres zones. Par exemple, un masque des domaines en végétation naturelle pourrait être effectué pour ne travailler que sur le domaine historiquement cultivé. Le processus de défriche serait ainsi retiré des analyses et les différents facteurs influençant le LAI pourraient être étudiés plus finement.

Le masque en question peut aussi concerner la dimension temporelle de l'étude : le travail réalisé sur les tendances de végétation, sur 15 ans, pourrait être transposée aux tendances annuelles de végétation. En effet, le modèle intègre un pas de temps journalier et peut donc fournir des indicateurs journaliers, décennaires ou mensuels de la végétation pour décortiquer le signal satellitaire.

Les autres thématiques à explorer, suite au dernier article, concernent les possibilités d'assimilation de données satellitaires dans les modèles de dynamiques des agroécosystèmes. Dans l'article 4, seul 4 points ont été réétalonnés pour présenter un exemple de la méthode ; la première chose à tester est maintenant le réétalonnage des autres points aberrants identifiés, pour mesurer l'efficacité de la méthode et la pertinence du recours à ce type d'assimilation. Plusieurs travaux pourraient ensuite être menés dans ce sens, pour développer des méthodologies d'assimilation plus systématique. La question de la généralité de la méthode pourrait aussi être étudiée, la méthode impliquant pour le moment un modèle très complexe et spécifique.

Perspectives d'application

- *Perspectives d'utilisation par les systèmes d'alerte précoce*

Cette thèse, par les méthodes développées et les analyses thématiques réalisées, offre d'ores et déjà d'importantes perspectives d'utilisation par les systèmes d'alerte précoce. Trois méthodes d'anticipation des crises ont ainsi été améliorées dans cette étude et sont prêtes à être utilisées. Ces trois méthodes contribuent au suivi des risques, sur différentes durées :

- Sur le court terme : l'intégration du modèle de culture SARRA-H dans le modèle développé a permis de spatialiser un modèle de culture et d'obtenir, plus directement qu'auparavant, des simulations plus fines. Cette amélioration est prête à être utilisée pour fournir, avec un pas de temps journalier, des indicateurs de développement des cultures finement spatialisés.
- Sur le moyen terme : Les méthodes d'estimation des surfaces emblavées, développées par les systèmes d'alerte précoce utilisent aujourd'hui les statistiques obtenues par enquête, les données satellitaires et parfois le suivi de certains facteurs déterminants, comme l'évolution des marchés. Les nouvelles connaissances obtenues dans cette thèse, concernant le poids des facteurs déterminants dans le choix des assolements (article 3), proposent une approche plus fine de détermination des surfaces, en tenant compte d'un plus grand nombre de facteurs. Elles ouvrent des perspectives intéressantes en matière de prévision agricole puisqu'elles offrent la possibilité de construire des scénarios prospectifs en faisant varier les différents facteurs déterminants. Il sera alors possible d'estimer de manière fiable les surfaces emblavées, avant chaque saison culturale, et, après avoir estimé les rendements à venir, de lancer l'alerte en cas de risque de pénurie d'aliments.
- Sur le long terme : Une partie de la thèse concerne les dynamiques de défriche sur le long terme et évalue les différentes mesures qui pourraient être prises (article 3). Ce travail lance d'ores et déjà l'alerte concernant les menaces sur les ressources forestières, si les dynamiques actuelles restent les mêmes pour les années à venir. La

réutilisation de ces résultats par les systèmes d'alerte précoce est envisageable et pourrait même appuyer l'établissement ou la promotion de mesures préventives.

Enfin, la méthode d'assimilation proposée (une fois mieux développée) pourrait être utilisée pour améliorer les modèles de dynamiques des agroécosystèmes utilisés par les systèmes d'alerte précoce. Cela contribuerait à affiner et rendre plus fiables les études prospectives.

- *Perspectives d'appui aux décisions*

L'étude prospective des dynamiques de défriche de la province du Tuy (article 2) tire la sonnette d'alarme sur la menace d'épuisement des ressources naturelles pour les années à venir. Les possibles actions évoquées dans cet article, à savoir la promotion de l'agroécologie et toutes les mesures à prendre pour faciliter la conversion des systèmes de production (restructuration des filières, accès au crédit, accès aux marchés) ainsi que la régulation démographique, peuvent servir d'appui à la mise en place de politiques publiques. Pour aller plus loin, le modèle développé pourrait même être proposé comme outil d'appui pour les décideurs, qui pourraient facilement simuler d'autres mesures à implémenter et évaluer ainsi leurs impacts.

Nous pourrions aussi imaginer une utilisation du modèle au niveau local. Comme souligné à plusieurs endroits dans cette thèse, les communes de la province du Tuy font face à des questions d'aménagement du territoire et d'organisation de la gestion des ressources naturelles. En sont témoins les conflits résurgents entre agriculteurs et éleveurs et entre autochtones et anciens migrants. Ces conflits concernent la plupart du temps l'accès aux ressources, les éleveurs voyant leurs zones de parcours et de pâturages progressivement grignotées par les cultures, et les autochtones, qui commencent à ressentir le manque de terres disponibles, reconsidérant l'installation des migrants sur leurs terres.

Plusieurs projets sont déjà en cours pour tenter de juguler ces tensions. Un projet particulier d'élaboration d'une charte foncière dans la commune de Koumbia (dans la partie sud de la zone d'étude), conjointement avec les villageois et les équipes de recherche (Vall et al., 2015), a déjà émergé depuis quelques années. Dans ce contexte, l'utilisation du modèle peut s'avérer très utile pour ouvrir des débats ou des discussions entre les parties concernées. Il serait par exemple possible de simuler des scénarios incluant des zones de parcours, en différents endroits, et d'évaluer les possibilités d'extension des exploitations, en tenant compte de ces zones. Ce type d'approche est déjà abordé dans les processus de modélisation participative. Le type de modélisation développé pour cette thèse apporterait un atout dans ce domaine, de par la finesse de la représentation spatiale qu'il propose et la prise en compte de processus multiscalaires.

Table des matières

Introduction	2
Sécurité alimentaire et changements agraires en Afrique de l'Ouest	2
Complexité du suivi de ces changements.....	3
Présentation générale de la thèse et organisation du manuscrit	4
Chapitre I : Contexte et problématique de la thèse.....	6
1. Systèmes d'alerte précoce et suivi des dynamiques agraires en Afrique	6
2. Le paysage agricole, source d'indicateurs clés pour les systèmes d'alerte précoce....	8
2.1. L'objet d'étude, le paysage agricole	8
2.2. Dynamique des paysages agricoles et changements d'utilisation, de couverture et de production des sols.....	9
2.3. Quelle étendue et quelles échelles pour l'étude des paysages agricoles ?	11
3. Les outils et méthodes utilisés par les systèmes d'alerte précoce au service de l'étude des paysages agricoles	13
3.1. La télédétection comme outil d'observation des évolutions des paysages	13
3.2. La modélisation comme outil d'analyse et de prospection des dynamiques des paysages	15
3.3. Utilisation conjointe de la modélisation et de la télédétection	21
4. Objectifs, questions de recherche et organisation de la thèse	23
4.1. Objectifs et questions de recherche.....	23
4.2. Organisation générale de la thèse.....	24
Chapitre II : Approche et données	28
1. L'approche systémique pour l'étude des paysages agricoles	28
1.1. Paysages et agroécosystèmes	28
1.2. Sous-systèmes des agrosystèmes.....	29
2. Présentation de la zone d'étude et données utilisées	32
2.1. Les paysages de la province du Tuy.....	33
2.2. L'activité agricole aujourd'hui	36

2.3.	Une histoire agraire particulière, construite autour du cotonnier	40
------	---	----

Chapitre III : De la parcelle à la région, modélisation spatialisée et multiscale des dynamiques des agroécosystèmes..... 46

1.	Idée générale : utilisation des graphes d'interaction entre échelles	47
1.1.	Ocelet, une approche par graphes d'interaction	47
1.2.	Positionnement par rapport aux autres approches	48
1.3.	Intérêt de l'approche Ocelet pour le changement d'échelle	48
2.	Résumé de l'article : <i>modélisation spatiale des dynamiques des agroécosystèmes à travers plusieurs échelles : un cas d'étude dans la région cotonnière de l'ouest du Burkina Faso</i>	51
2.1.	Méthode	51
2.2.	Résultats.....	53
2.3.	Discussion	56
3.	Article 1 : <i>Spatial modelling of agro-ecosystem dynamics across scales: A case in the cotton region of West-Burkina Faso</i>	58
3.1.	Introduction.....	59
3.2.	Material and method.....	61
3.3.	Model.....	64
3.4.	Results.....	70
3.5.	Discussion	76
3.6.	Conclusion	79

Chapitre IV : Vers une amélioration de la compréhension des dynamiques passées et futures de l'agroécosystème de la province du Tuy 82

1.	Résumé de l'article 2 : <i>Analyser les futurs plausibles sur la base des processus passés d'évolution des paysages, à l'ouest du Burkina Faso</i>	84
1.1.	Résultats liminaires : Construction et évaluation du modèle à partir des études de terrain 84	
1.2.	Résultats : analyse des changements passés et prospection du futur	85
1.3.	Discussion	88
2.	Article 2: <i>Analyzing plausible futures from past patterns of land change in West Burkina Faso</i>	91
2.1.	Introduction.....	92
2.2.	Material and method.....	93

2.3.	Model construction and evaluation.....	97
2.4.	Results: Assessing past land change and prospecting the future	102
2.5.	Discussion and conclusion.....	107
2.6.	Conclusion	112
3.	<i>Article 3 : Modélisation des processus de décision des assolements : quelle marge de manœuvre pour les agriculteurs du Burkina Faso ?</i>	<i>113</i>
3.1.	Introduction.....	113
3.2.	Matériel et méthode	115
3.3.	Résultats liminaires : compréhension des stratégies d'assolement et construction du modèle.....	119
3.4.	Résultats de la modélisation : poids des facteurs dans les assolements	126
3.5.	Discussion	131
3.6.	Conclusion	134
Chapitre V : Vers une amélioration du suivi des changements des agroécosystèmes, par croisement entre modélisation spatiale et information satellitaire		
136		
1.	Rappel sur les méthodes d'assimilation de données de télédétection dans les modèles de culture	137
1.1.	Les indices de végétation issus de la télédétection.....	137
1.2.	Les méthodes d'assimilation.....	138
2.	<i>Article 4 : Détecter les processus de changement des paysages dans les images, le lien entre modélisation spatiale et télédétection.....</i>	<i>142</i>
1.3.	Introduction.....	142
1.4.	Données et méthode.....	143
1.5.	Résultats	151
1.6.	Discussion	155
1.7.	Conclusion	160
Conclusion		
162		
Contributions de la thèse		
162		
Les contributions méthodologiques :		
162		
Les contributions thématiques :		
164		
Enseignements tirés des limites rencontrées.....		
165		

Concernant le modèle développé et la plateforme de modélisation	166
Concernant l'utilisation des zonages en télédétection, pour faire le lien avec les modèles.....	166
Concernant l'approche transdisciplinaire	167
Perspectives de la thèse	168
Perspectives de recherche	168
Perspectives d'application.....	170
<i>Liste des figures</i>	172
<i>Liste des tableaux</i>	179
<i>Références bibliographiques</i>	180

Liste des figures

<i>Figure 1: Facteurs à l'origine des évolutions des paysages.</i>	10
<i>Figure 2: Comparaison des résolutions spatiales des capteurs MODIS, LANDSAT et PLEIADES, pour une même étendue (basée sur l'étendue d'une image PLEIADES)</i>	14
<i>Figure 3: Schématisation du fonctionnement du modèle SARRA-H.</i>	19
<i>Figure 4: Méthodes d'intégration des modèles de culture au niveau régional.</i>	20
<i>Figure 5: Couplages entre données satellitaires et modèles de culture.</i>	22
<i>Figure 6 : Organisation générale de la thèse.</i>	26
<i>Figure 7 : organisation de l'agroécosystème et lien avec les indicateurs paysagers (utilisation, occupation et production du sol) et leurs facteurs déterminants.</i>	31
<i>Figure 8: Localisation de la zone d'étude.</i>	32
<i>Figure 9 : Pédologie de la zone d'étude (Leprun et Moreau, 1961 ; Moran P., 1991).</i>	34
<i>Figure 10 : Pluviométrie annuelle et interannuelle (source MeteoNat Burkina Faso, Modèle numérique de terrain).</i>	35
<i>Figure 11: Relief, villages et axes routiers.</i>	36
<i>Figure 12: Occupation du sol de la zone du Tuy. (Carte dérivée d'images Landsat 2014, photographies Jahel).</i>	37
<i>Figure 13 : calendrier cultural des trois principales espèces de la zone (CIRAD-CIRDES-UPPCT-INADES, 2008).</i>	38
<i>Figure 14 : Evolution de la population de la province du TUY (RGPH 1975, 1985, 1996 et 2006)</i>	43
<i>Figure 15 : Evolution des rendements de coton (données Sofitex).</i>	44
<i>Figure 16 : Schéma du graphe d'interaction pris en exemple pour illustrer l'utilisation d'Ocelet.</i>	50
<i>Figure 17 : Entités et relations structurant le modèle.</i>	51
<i>Figure 18: Les trois dynamiques modélisées et les échelles et niveaux d'organisation impliqués.</i>	53
<i>Figure 19: Sorties du modèle.</i>	54
<i>Figure 20: Production de maïs par exploitation.</i>	55
<i>Figure 21: Comparaison des proportions de chaque groupe de cultures pour les deux scénarios</i>	55
<i>Figure 22: Comparaison des rendements pour chacun des types d'agriculteurs et de la production à l'échelle de la province en fonction des deux scénarios.</i>	56
<i>Figure 23: Entête de l'article publié en Mai 2016</i>	58
<i>Figure 24: a) Location map of the study area in Burkina Faso (the boundary of the Tuy province is in dotted lines); b) spatial and inter-annual (2000-2013) variability of the rainfall measured over four villages in the study area. Climate data are from the Meteo</i>	62
<i>Figure 25: a) Farmers typology (Marre-Cast and Vall, 2013) ; b) Evolution of the main crops harvested areas (sources : AGHRYMET, and SOFITEX for the cotton).</i>	62
<i>Figure 26: a) Simplified land cover map obtained from Landsat images over the study area(2000), and b) zoom showing the combination of the simplified land cover map and the plot structure derived from SPOT5 image showing the plot structure (2014) (Zermeno, 2015).</i>	63

<i>Figure 27: Model structure: relations between entities.</i>	66
<i>Figure 28: Scenario structure.</i>	69
<i>Figure 29: The three main processes modelled with explicit reference to different levels.</i>	69
<i>Figure 30: Overview of the model, the inputs involved and the outputs generated. The input and parameters possibly changed to create alternatives scenarios are in green.</i>	70
<i>Figure 31: Examples of model outputs at a) the province, b) farm, and c) field levels.</i>	71
<i>Figure 32: Maize production and area per farm according to the two farmer strategies of the geographic distribution of the plots.</i>	73
<i>Figure 33: Comparison of the proportions of each crop group for the two scenarios.</i>	74
<i>Figure 34: Maize yield and production in the Tuy province given by farmer type, and according to the fertilization rate.</i>	75
<i>Figure 35: Liens entre les facteurs à l'origine de la déforestation.</i>	85
<i>Figure 36: Résultats concernant les facteurs responsables des défriches.</i>	86
<i>Figure 37: Résultats des scénarios concernant les critères de localisation des défriches.</i>	86
<i>Figure 38: Cartes d'intensité des défriches simulées par le modèle en fonction des différents scénarios rétrospectifs.</i>	87
<i>Figure 39: Evolution de la végétation naturelle en fonction de différents scénarios d'évolution de la population.</i>	88
<i>Figure 40: Evolution de la végétation naturelle en fonction de différents scénarios de mesures pouvant être prises ou d'adaptation des populations.</i>	88
<i>Figure 41: Localization of study area.</i>	94
<i>Figure 42: Maps of crop/non-crop area for the years a) 2000, b) 2007 and c) 2014).</i>	97
<i>Figure 43: Interacting factors resulting in the processes of land clearing</i>	99
<i>Figure 44: Chronological events that have led to land dynamics.</i>	100
<i>Figure 45: Model structure.</i>	101
<i>Figure 46: Map of deforestation intensity simulated by the model.</i>	102
<i>Figure 47: Maps of deforestation intensity depending to sensitivity tests.</i>	103
<i>Figure 48: Maps of deforestation intensity depending to the plot choice scenario.</i>	103
<i>Figure 49: Maps of deforestation intensity depending to the land exchange scenario.</i>	104
<i>Figure 50: Number of farms that could not settle depending to the land exchange scenario.</i>	104
<i>Figure 51: Evolution of natural vegetation areas depending on population growth and population emigration.</i>	105
<i>Figure 52: Evolution of natural vegetation areas depending on different measures implemented or population adaptation.</i>	106
<i>Figure 53: Evolution of the number of farms that could not be created because of lack of space.</i>	107
<i>Figure 54: Four populating areas in West Africa. (WALTPS in Bossard 2003).</i>	109
<i>Figure 55: Evolution des proportions (graphique du haut) et des prix (graphique du bas) des espèces cultivées.</i>	116
<i>Figure 56: Processus de décision en fonction des objectifs.</i>	122

<i>Figure 57: Structure du modèle.</i>	126
<i>Figure 58: Comparaison des proportions simulées avec celles issues des statistiques agricoles (AGRHYMET)</i>	127
<i>Figure 59: Evolution du poids des différents facteurs déterminants.</i>	129
<i>Figure 60: Evolution du poids des objectifs ayant joué pour la surface des céréales dans les assolements.</i>	130
<i>Figure 61: Evolution du poids des objectifs et déterminants ayant joué pour la surface du coton dans les assolements.</i>	130
<i>Figure 62: Schéma des deux approches.</i>	139
<i>Figure 63: Différentes méthodes d'assimilation dans les modèles de culture (adapté de Lauvernet, 2005).</i>	141
<i>Figure 64: Tendances de NDVI entre 2000 et 2015 dans la zone d'étude (Leroux et al., 2015).</i>	144
<i>Figure 65: Sorties du modèle : exemple des trois cartes obtenues pour l'année 2010.</i>	145
<i>Figure 66. Méthodologie.</i>	150
<i>Figure 67: Régressions linéaires (de gauche à droite : tendances d'évolution des surfaces en végétation naturelle/tendances de NDVI, tendances de LAI/tendances de NDVI, tendances des proportions de maïs/NDVI.</i>	151
<i>Figure 68: Sorties de l'algorithme Random Rorest : Mean Decrease in Accuracy.</i>	152
<i>Figure 69: Contributions des différents facteurs aux classes.</i>	152
<i>Figure 70: Répartition spatiales de la typologie de tendances.</i>	154

Liste des tableaux

<i>Table 1: Caractéristiques de différents capteurs dans le domaine optique.</i>	14
<i>Table 2 : caractéristiques des différents types d'agriculteurs</i>	40
<i>Table 3 Description of the data used as input of the model.</i>	64
<i>Table 4. Entities of the model and their main properties and topology.</i>	66
<i>Table 5: Processes and organization levels involved in the three simulation experiments.</i>	72
<i>Table 6: Maps produced from several remote sensing products.</i>	95
<i>Table 7. Presentation data collected.</i>	96
<i>Table 8. Parameters of farm expansion</i>	98
<i>Table 9: Récapitulatif des différents facteurs déterminants.</i>	119
<i>Table 10: Comparaison des proportions des espèces cultivées issues des images satellitaires et du modèle.</i>	128
<i>Table 11: Poids des facteurs déterminants dans les choix des assolements pour toute la période étudiée.</i>	128
<i>Table 12: Différents indices de végétation (Leroux, 2015).</i>	138
<i>Table 13: Classement et interprétation des tendances de NDVI (Leroux et al., 2015).</i>	148
<i>Table 14: Résultats des tests de corrélation (test de Pearson) et des régressions linéaires.</i>	151
<i>Table 15: Moyenne de différentes variables ou processus par classe de tendances.</i>	153
<i>Table 16: comparaison des facteurs à l'origine des simulations et ceux de la typologie de tendances.</i>	155

Références bibliographiques

A

- Agarwal, C., Green, G.M., Grove, J.M., Evans, T.P., Schweik, C.M., 2002. A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station.
- Ancy G., 1975. Niveaux de décision et fonctions objectifs en milieu rural africain. Ed. Amira, Paris, France.
- Angelsen A., Kaimowitz D., 1999. Rethinking the causes of deforestation: lessons from economic models. *The world bank research observer* 14(1): 73-98.
- Amanor K. S., Pabi O., 2007. Space, time, rhetoric and agricultural change in the transition zone of Ghana. *Human Ecology* 35(1): 51-67.
- Antrop, M., 2005. Why landscapes of the past are important for the future. *Landscape and urban planning* 70(1): 21-34.
- Aubréville, A., 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'Éditions Maritimes et Coloniales, Paris, 351 p.
- Aubry C., Papy F., Capillon A., 1998a. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems*, 56 (1): 45-65.
- Aubry C., Biarnes A., Maxime F., Papy F., 1998b. Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole : la constitution de système de culture. *Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement* 31: 25-43.
- Aubry C., 2007. La gestion technique des exploitations agricoles. Composante de la théorie agronomique. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Institut National Polytechnique De Toulouse, pp. 101.
- Augusseau, X., 2007. Evolution des systèmes agropastoraux dans le sud-ouest du Burkina Faso, interactions et dynamiques territoriales. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier.

Augusseau X., Lestrelin G., David D., Degenne P., Lo Seen D., 2015. Des modèles et simulations spatio-temporelles comme "objets intermédiaires" pour mettre en débat l'étalement urbain à La Réunion. 52ème colloque de l'Association de Science Régionale de Langue Française. Territoires méditerranéens : agriculture, alimentation et villes. 7-9 juillet, Montpellier, France.

B

- Baati L., 2007. Approche de modélisation DEVS à structure hiérarchique et dynamique. *Schedae*, prépublication 15 (2) : 61-70.
- Bainville S. et Dufumier M., 2009. Diversité des exploitations agricoles en zone cotonnière du Burkina Faso, AFD.
- Baron C., Bonnal, V. Dingkuhn, M. Maraux, F. Sarr, M., 2003. SARRA-H : Système d'Analyse Régional des Risques Agroclimatiques-Habillé (System for Regional Analysis of Agro-Climatic Risks). In: Struif Bontkes Tjark (ed.), Wopereis Marco (ed.). Decision support tools for smallholder agriculture in Sub-Saharan Africa: A practical guide. Muscle Shoals : IFDC, 192-194.
- Baulies X. et Szejwach G. (Eds.), (1998). LUC Data Requirements Workshop: Survey of Needs, Gaps and Priorities on Data for Land-use/land-cover Change Research, Barcelona, 11-14 November 1997. Institut Cartogràfic de Catalunya.
- BDOT, 2007. Guide technique de la nomenclature BDOT du Burkina Faso. Institut Géographique du Burkina Faso.
- Bégué A., Leroux L., Lo Seen D., Tonneau J.P., Morant P., 2016. Observation spatiale pour l'agriculture en Afrique: potentiels et défis. Charrier B. (ed.), Torre C. (ed.), Notes techniques: AFD 12, 182 p.
- Benoît M., Rizzo D., Marraccini E., Moonen A.C., Galli M., Lardon S, Rapey H., Thenail C, Bonari E., 2012. Landscape agronomy: a new field for addressing agricultural landscape dynamics. *Landscape Ecology* 27: 1385-1394.
- Bernier F., 2009. Production cotonnière et développement des exploitations familiales. Diagnostic agraire de la zone de GombéléDougou (Région des Hauts Bassins, Burkina Faso). Mémoire de fin d'étude ESAT, SupAgro-IRC, Montpellier.

- Bertalanffy L. von., 1980. Théorie générale des systèmes. Trad. Franç. de J-P. Chabrol, Dunod, Paris.
- Bierkens M.F.P., Finke P.A., deWilligen P., 2000. Upscaling and downscaling methods for environmental research. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Bisquert M., Deshayes M., Begué A., 2014. Stratification du territoire français en paysages radiométriques homogènes. Poster CIRAD.
- Blazy J-M., Chopin P., Doré T., Wery J., 2015. Integrating Field, Farm And Territory Scales In The Design Of Agricultural Systems? In the Farming System Design 2015 congress, Montpellier, France.
- Bongaarts J., 1994. Population policy options in the developing world. *East Asia* 5(2.3): 13-75.
- Boote, K. J., Jones, J. W., Pickering, N. B., 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, 88(5): 704-716.
- Borshchev A., Filippov A., 2004. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: Reasons, techniques, tools. In Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society, 22.
- Boserup E., 1965. The conditions of agricultural growth : the economics of agrarian change under population pressure. G. Allen et Unwin, London, United Kingdom:
- Bossard L., 2003. Peuplement et migration en Afrique de l'Ouest: une crise régionale en Côte d'Ivoire. *Afrique Contemporaine* 2: 151-165.
- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H., and Le Page, C., 1998. Cormas: Common-pool resources and multi-agent systems. In Pasqual del Pobil, A., Mira, J., and Ali, M., editors, *Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence*, volume 1416 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 826:837. Springer Berlin / Heidelberg.
- 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.
- Brandt M., Hiernaux P., Rasmussen K., Mbow C., Kergoat L., Tagesson T., Ibrahim Y.Z., Wélé A., Tucker C.J., Fensholt R., 2016. Assessing woody vegetation trends in Sahelian drylands using MODIS based seasonal metrics. *Remote Sensing of Environment* 183: 215–225.
- Brossier J., 1987. Système et système de production, Note sur ces concepts. *Cahier des Sciences Humaines* 23: 377-390
- Brossier J., Chia E., Marshall E., Petit M., 1991. Gestion de l'exploitation agricole familiale et pratiques des agriculteurs: vers une nouvelle théorie de la gestion. *Canadian Journal of Agricultural Economics* 39(2) : 119-135.
- Brown, D.G., Duh, J.-D., 2004. Spatial simulation for translating from land use to land cover, *International Journal of Geographical Information Science*, 18 (1) : 35-60.
- Brown M.E., Funk C.C., Galu G., and Choularton R., 2007. Earlier famine warning possible using remote sensing and models. *Eos*, 88:39.
- Bürgi M., Russell E.W.B., 2001. Integrative methods to study landscape changes. *Land Use Policy* 18 : 9-16
- ## C
- Caillault S., 2011. Le feu, la brousse et la savanne, modélisation spatiale de la dynamique des paysages soudaniens (Burkina Faso), Université de Caen Basse Normandie.
- Caillault S., Ballouche A., Delahay D., 2012. Vers la disparition des brousses? Analyse multi-scalaire de la dynamique des paysages à l'ouest du Burkina Faso depuis 1952. *European Journal of Geography* 599.
- Caron P., Biénabe E., Hainzelin E., 2014. Making transition towards ecological intensification of agriculture a reality: the gaps in and the role of scientific knowledge. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 8 : 44-52.
- Cassman K.G., 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96: 5952-5959.
- 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.
- Castets M., 2015. Pavages réguliers et modélisation des dynamiques spatiales à base de graphes d'interaction : conception, implémentation,

- application. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier.
- P. Cayrol., 2000. Assimilation de données satellitales dans un modèle de croissance de la végétation et de bilan d'énergie : application à des zones semi-arides. Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse.
- CCRS, 2005. Notions fondamentales de télédétection. En ligne <http://www.rncan.gc.ca>.
- Cerf M., Sébillotte M., 1997. Approche cognitive des décisions de production dans l'exploitation agricole [Confrontation aux théories de la décision]. In: *Économie rurale* 239: 11-18
- Chahbi A., Zribi M., Lili-Chabaane Z., Duchemin B., Shabou M., Mougnot B., Boulet G., 2014. Estimation of the dynamics and yields of cereals in a semi-arid area using remote sensing and the SAFY growth model. *International Journal of Remote Sensing*, 35, 1004–1028.
- Chevassus-au-Louis B., Griffon M., 2008. La nouvelle modernité: une agriculture productive à haute valeur écologique. *Déméter*: 7-48.
- Chopin P., Doré T., Guindé L., Blazy J-M, 2015. MOSAICA: A multi-scale bioeconomic model for the design and ex ante assessment of cropping system mosaics. *Agricultural Systems* 140 : 26–39.
- CIRAD, CIRDES, UPPCT, INADES, 2008. Diagnostic agropastoral du village de Koumbia. Projet FERTIPARTENAIRES, Bobo Dioulasso (Burkina), pp. 56.
- J.G.P.W. Clevers, 1997. A simplified approach for yield prediction of sugar beet on optical remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 61 : 221–228.
- Cochet H., 2004. Agrarian dynamics, population growth and resource management: The case of Burundi . *GeoJournal* 60 (2): 111–122.
- Cochet H., 2015. Controverses sur l'efficacité économique des agricultures familiales: indicateurs pour une comparaison rigoureuse avec d'autres agricultures. *Revue Tiers Monde* 221 (1) : 9-25.
- Cochet H., Devienne S., Dufumier M., 2007. L'agriculture comparée, une discipline de synthèse ?. *Économie rurale* (1) : 297-298.
- Cochet H., 2011. L'agriculture comparée. Quae éditions.
- Conway G.R., 1984. *Agroecosystem Analysis*. Agricultural Administration 20 : 31-55.
- Costanza R., 1987. Simulation modeling on the macintosh using stella. *BioScience* 37 :129-132.
- Coulibaly K., Vall E., Autfray P., Sedogo P. M., 2012. Performance technico-économique des associations maïs/niébé et maïs/mucuna en situation réelle de culture au Burkina Faso: potentiels et contraintes. *Tropicultura* 30(3) : 147-154.
- Cowan Y., O'Brien E. et Rakotomalala-Rakotondrandria N., 2014. Systèmes d'Alerte Précoce au Niveau Communautaire : Pratiques clés pour les praticiens de la RRC, OCHA et FAO.

D

- David D., Augusseau X., Lo Seen D., Degenne P., Lestrelin G., Lagabrielle E., 2013. Exploring future urban sprawl with the Ocelet langage. A spatial simulation model developed with planners and researchers in Reunion Island (Indian Ocean)., *European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography (ECTQG)*, Dourdan France.
- Deffontaines J-P., 1973. Analyse du paysage et étude régionale des systèmes de production agricole, *Economie rurale* n°98, pp. 3-13.
- Deffontaines J-P., Thenail C., Baudry J., 1995. Agricultural systems and landscape patterns: how can we build a relationship ? *Landscape and urban planning* 31, pp. 3-10.
- Degenne P., Lo Seen D., 2016. Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graphs. *SoftwareX* (In Press).
- Degenne P, 2011. Une approche générique de la modélisation spatiale et temporelle. Thèse de Doctorat, Université Paris Est.
- Degenne P., Parigot D., Curé, O., Ait Lahcen, A., Forax R., and Lo Seen D, 2010. Modelling the environment using graphs with behaviour : do you speak ocelet ? In *International Congress on Environmental Modelling and Software*, Ottawa, Canada.
- Degenne P, Lo Seen D, Parigot D, Forax R, Tran A, Ait Lahcen A, Curé O, Jeansoulin R, 2009. Design of a domain specific language for

- modelling processes in landscapes. *Ecological Modelling*, 220(24): 3527–3535.
- Deressa T. T., Hassan R. M., Ringler C., Alemu T., Yesuf M., 2009. Determinants of farmers' choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia. *Global Environmental Change* 19 (2) : 248-255.
- Diallo, M.A., Vall, E., 2010. Changements paysagers et dynamiques pastorales dans l'ouest du Burkina Faso. *Rencontre autour des Recherches sur les Ruminants* 17 : 175–178.
- Dingkuhn M., Baron C., Bonnal V., Maraux F., Sarr B., Clopes A., Forest F., 2003. Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales, in: Struif, B.T., Wopereis, M. (Eds.), *Decision Support Tools for Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa : A Practical Guide*. pp. 127–139.
- Djoudi H., Vergles E., Blackie R., Koffi Koame C., Gautier D., 2015. Dry forests, livelihoods and poverty alleviation: understanding current trends. *International Forestry Review*, 17 (S2) : 54-69.
- Donet I., 1999. Étude sur l'interpolation de l'ETP quotidienne en points de grille. Report SCEM/SERV/AGRO, Toulouse.
- Dounias I., Aubry C., et Capillon A., 2002. Decision-making processes for crop management on African farms. *Modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon. Agricultural systems* 73(3): 233-260.
- Dovers S.R., 1995. A framework for scaling and raming policy problems in sustainability. *Ecological Economics* 12 : 93–106.
- Dowd-Uribe B., 2014. Engineering yields and inequality? How institutions and agro-ecology shape Bt cotton outcomes in Burkina Faso. *Geoforum* 53: 161-171.
- Dury J., Schaller N., Garcia F., Reynaud A., Bergez, J.E. (2011). Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review. *Agronomy for sustainable development*, 32(2), 567-580.
- Ehrlich P., Holdren J., 1974. The impact of population growth. *Science* 171: 1212–1217.
- Ezeh A. C., Bongaarts J., Mberu B., 2012. Global population trends and policy options. *The Lancet* 380 (9837) : 142-148.
- ## F
- Fabre, J., Louchart, X., Moussa, R., Dagès, C., Colin, F., Rabotin, M., Raclot, D., Lagacherie, P., and Voltz, M., 2010. Openfluid : a software environment for modelling fluxes in landscapes. *LANDMOD2010*, Montpellier, France.
- Faivre R., Leenhardt D., Voltz M., Benoît M., Papy F., Dedieu G., Wallach D., 2004. Spatialising crop models. *Agronomie, EDP Sciences*, 2004, 24 (4), pp.205-217.
- Fall A., Fortin M., Manseau M., OBrien D., 2007. Spatial graphs: Principles and applications for habitat connectivity. *Ecosystems*, 10, 448–461.
- FAO, 2009a. Comment nourrir le monde en 2050. Le défi spécifique à l'Afrique subsaharienne. Rome (Italie), pp.4.
- FAO, 2009b. Comment nourrir le monde en 2050. L'agriculture mondiale à l'horizon 2050. Rome (Italie), pp.4.
- FAO, 2013. Suivi des politiques agricoles et alimentaires en Afrique. *Revue des politiques agricoles et alimentaires au Burkina Faso*. Rome (Italie), pp. 225.
- FAO, 2015a. L'État de l'insécurité alimentaire dans le monde Objectifs internationaux 2015 de réduction de la faim: des progrès inégaux. Rome (Italie), pp. 61.
- FAO, 2015b. Vue d'ensemble régionale de l'insécurité alimentaire en Afrique. Des perspectives plus favorables que jamais. Accra (Ghana), pp.26.
- FAO, 2014. Systèmes d'alerte Précoce au Niveau Communautaire : Pratiques clés pour les praticiens de la RRC. Rome (Italie), pp.30.
- Ferber J., 1995. Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective. Inter-Editions, Paris.
- Fok M., 2006. Ajustements nationaux de mécanismes prix face aux fluctuations du prix mondial : les leçons du coton en Afrique Zone Franc. CERI.

E

Ford A., 1999. Modeling the environment : an introduction to system dynamics models of environmental systems. Island Press, Washington DC.

Forrester J., 1968. Principles of Systems. Wright-Allen Press Cambridge, Mass.

Francois C., Cayrol P., Kergoat L., Moulin S., 2001. Assimilation techniques of remote sensing measurements into vegetation models: overview, limits and promises. In Physical measurements et signatures in remote sensing. International symposium: 649-658.

G

Gafsi M., Dugué P., Jamin J.-Y., Brossier J., 2007. Exploitations agricoles familiales en Afrique de l'Ouest et du Centre. Editions Quae.

Gao, B.-C., 1996. NDWI - A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. Remote Sensing of Environment 58, 257-266.

Gasser L., Braganza C., Herman, N., 1987. MACE: A flexible testbed for distributed AI research. Distributed AI.

Gasselin P., 2013. Diversité des approches systémiques sociales. Conférence Montpellier Master 2R « Territorialités et Développements ».

Gaucherel, C., Giboire, N., Viaud, V., Houet, T., Baudry, J., and Burel, F., 2006. A domain-specific language for patchy landscape modelling : The brittany agricultural mosaic as a case study. Ecological Modelling, 194(1-3): 233-243.

Geist H. J., Lambin E. F. , 2002. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations. BioScience 52(2): 143-150.

Gessner U., Machwitz M., Esch T., Tillack A., Naeimi V., Kuenzer C., Dech S., 2015. Multi-sensor mapping of West African land cover using MODIS, ASAR and TanDEM-X/TerraSAR-X data. Remote Sensing of Environment 164, 282-297.

Gibson C., Ostrom E., Ahn T.K., 1999. The concept of scale and the human dimension of global

change: a survey. Ecological Economics 32: 17-239.

Giller K.E., Witter E., Corbeels M., Tiftonell P., 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: the heretics' view. Field Crops Research 114 : 23-34.

Goldewijk K. K., 2001. Estimating global land use change over the past 300 years: the HYDE database. Global Biogeochemical Cycles 15 (2): 417-433.

Gotelli N. J., Ellison A. M., 2002. Biogeography at a regional scale: determinants of ant species density in New England bogs and forests. Ecology, 83 (6): 1604-1609.

Green R. E., Cornell S. J., Scharlemann J. P., Balmford A., 2005. Farming and the fate of wild nature. Science 307 (5709): 550-555.

Grignard, A., Taillandier, P., Gaudou, B., Vo, D., Huynh, N., and Drogoul, A. (2013). Gama 1.6 : Advancing the art of complex agent-based modeling and simulation. In 'PRIMA 2013 : Principles and Practice of Multi-Agent Systems', Lecture Notes in Computer Science, Springer, 8291 :117-131.

Guenot A., Huchet-Bourdon M., 2014. Rôle du coton sur la filière maïs au Burkina Faso. Économie rurale (3) : 107-119.

Guillemot S, 2016. Utilisation de données d'estimation des précipitations par satellite avec un modèle de culture, application à la province de Tuy (Burkina Faso), mémoire de master, Université Montpellier.

Guyer J., Lambin I., 1993. Land Use in an Urban Hinterland: Ethnography and Remote Sensing in the Study of African Intensification. American anthropologist 95 (4): 839-859.

H

Haberl H., Erb K. H., Krausmann F., Gaube V., Bondeau A., Plutzer C., et al., 2007. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences 104 (31): 12942-12947.

Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., et al., 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science, 342(6160): 850-853.

Hatfield J.L., Kanemasu E.T., Asrar G., Jackson R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Idso, S.B., 1984. Leaf-area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. *Int. J. Remote Sensing* 46: 651–656.

Henry S., Boyle P., Lambin E. F., 2003. Modelling inter-provincial migration in Burkina Faso, West Africa: the role of socio-demographic and environmental factors. *Applied Geography*, 23(2): 115-136.

Hewitt C., 1976. Viewing control structures as patterns of passing messages. Technical report, Massachusetts Institute of Technology.

Hiernaux P., Ayantunde A., Kalilou A., Mougin E., Gérard B., Baup F., Grippa M., Djaby B., 2009. Trends in productivity of crops, fallow and rangelands in Southwest Niger : Impact of land use , management and variable rainfall. *Journal of Hydrology* 375: 65–77.

Holben B.N., Tucker C.J., Fan C.J., 1980. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46: 651–656.

Houet T., 2006. Modélisation prospective de l'occupation du sol en zone agricole intensive dans la France de l'Ouest. *Norois*, (1), 35-47.

Houet T., Verburg P.H., Loveland T.R., 2010. Monitoring and modelling landscape dynamics. *Landscape Ecology* 25, 163–167.

Houet T., Schaller N., Castet M., Gaucherel C., 2014. Improving the simulation of fine-resolution landscape changes by coupling top-down and bottom-up land use and cover changes rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(9): 1848–1876.

Huete, A., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 8 : 295–309.

Huete, A., Justice, C., van Leeuwen, W., 1999. MODIS Vegetation Index (MOD 13). Version 3. Algorithm Theoretical Basis Document.

I

IFRC, 2012. Community Early Warning Systems: Guiding Principles. Genève (Suisse), pp.77.

J

Jahel C., Baron C., Vall E., Karambini M., Castets M., Coulibaly K., Bégué A., Lo Seen D., 2016.

Spatial modelling of agro-ecosystem dynamics across scales: A case in the cotton region of West-Burkina Faso. *Agricultural Systems*. (In press).

Janssen S., Van Ittersum M.K., 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems* 94: 622–636.

Jonge M. D., Wortel M. J. R., Spakman W., 1994. Regional scale tectonic evolution and the seismic velocity structure of the lithosphere and upper mantle: the Mediterranean region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B6) : 12091-12108.

Jouve P., 2006. La dimension spatiale des systèmes de culture: comparaison entre agriculture tempérée et agriculture tropicale. *Cahiers Agricultures* 15 (3) : 255-260.

Jouve P., 2006. « Transition agricole : la croissance démographique, une opportunité ou une contrainte ? » *Afrique contemporaine* 217 (1): 43.

K

Kay R., Edwards W., 1999. Farm management, 4e édition. Ed. McGraw-Hill, Boston, États-Unis, pp. 464.

Kaptué Tchuenté, A.T., Prihodko L., Hanan N.P., 2015. On regreening and degradation in Sahelian watersheds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 1–6.

Kelly R., A.J. J., Barreteau O., Borsuk M., Elsworth S., Hamilton S., Henriksen H., Kuikka S., Maier H., Rizzoli A., Van Delden H., Voinov A., 2013. Selecting among _ve common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling and Software* 47 :159-181.

Kindu M., Schneider T., Teketay D., Knoke T., 2015. Drivers of land use/land cover changes in Munessa-Shashemene landscape of the south-central highlands of Ethiopia. *Environmental monitoring and assessment*, 187, 1–17.

King A.W., Johnson A.R., O'Neill R.V., DeAngelis D.L., 1989. Using ecosystem models to predict regional CO₂ exchange between the atmosphere and the terrestrial biosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, 3, 337–361.

Kouressy M., Dingkuhn M., Vaksman M., Heinemann A.B., 2008. Adaptation to diverse

- semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 357–371.
- Krieger, F., Malila, W., Nalepka, R., Richerdson, W., 1969. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition, in: 6th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. University of Michigan, pp. 97–131.
- Kuemerle T., Erb K., Meyfroidt P., Müller D. et al. (2013). Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5: 484-493.
- ## L
- Lambert M.J., Waldner F., Defourny P., 2016. Cropland Mapping over Sahelian and Sudanian Agrosystems : A Knowledge-Based Approach Using PROBA-V Time Series at 100-m. *Remote Sensing* 8, 1–23.
- Lambin E. F., Turner B. L., Geist H. J., Agbola S. B., Angelsen A., Bruce J. W., Coomes O.T., et al., 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global environmental change* 11(4): 261-269.
- Lambin E.F., Meyfroidt P., 2011. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(9): 3465-3472.
- Laniak G., Olchin G., Goodall J., Voinov A., Hill M., Glynn P., Whelan G., Geller G., Quinn N., Blind M., Peckham S., Reaney S., Gaber N., Kennedy R., and Hughes A., 2013. Integrated environmental modeling : a vision and roadmap for the future. *Environmental Modelling and Software*, 39 :3-23.
- Lauvernet, C., 2005. Assimilation variationnelle d'observations de télédétection dans les modèles de fonctionnement de la végétation: utilisation du modèle adjoint et prise en compte de contraintes spatiales. Thèse de Doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- Leach M., Fairhead J., 2000. Challenging Neo-Malthusian Deforestation Analyses in West Africa's Dynamic Forest Landscapes. *Population and Development Review* 26 (1): 17– 43.
- Lecerf R., 2008. Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne). Thèse de Doctorat, Université de Rennes 2.
- Leenhardt D., Angevin F., Biarnès A., Colbach N., Mignolet C., 2010. Describing and locating cropping systems on a regional scale, a review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 131-138.
- Leenhardt D., Therond O., Cordier M-O., Gascuel-Oudou C., Reynaud A., Durand P., Bergez J.E., Clavel L., Masson V., Moreau P., 2012. A generic framework for scenario exercises using models applied to water resource management. *Environmental Modelling & Software*, 37: 125-133.
- Leprun J-C., Moreau R., 1961. Etude pédologique de la Haute-Volta, région Ouest-Nord. O.R.S.T.O.M.
- Leroux, 2015. Suivi et caractérisation des dynamiques de la production agricole en Afrique de l'Ouest par télédétection à moyenne résolution spatiale. Thèse de Doctorat, AgroParisTech.
- Leroux L., Jolivot A. , Bégué A. , Lo Seen D, Zoungrana B., 2014. How reliable is the MODIS land cover product for crop mapping sub-saharan agricultural landscapes? *Remote Sensing* 6: 8541-8564.
- Leroux L., Bégué A., Lo Seen D., Jolivot A., Kayitakire F., 2016. Driving forces of recent vegetation changes in the Sahel: lessons learned from regional and local level analyses. *Remote Sensing of Environment (Under Review)*.
- Lestrelin G., Augusseau X., David D., Lagabrielle E., Lo Seen D., Bourgoïn J., Degenne P. , 2013. Collaborative landscape research in Reunion Island: Participatory modelling and spatial simulation to foster dialogue and knowledge integration. , International Association for Landscape Ecology (IALE) 2013 European Congress: Changing European Landscapes, Manchester (UK).
- Licker R., Johnston M., Foley J. A., Barford C., Kucharik C. J., Monfreda C., Ramankutty N., 2010. Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the 'yield gap' of croplands around the world? *Global Ecology and Biogeography* 19: 769–782.

Lugan J-C., 2009. La systémique sociale. Que sais-je n°2738, Presses universitaires de France, pp.128

M

Mahaman I., 2001. Evolution à long terme de la fertilité des sols dans la région de Maradi, Drylands Research Working Paper, 30.

Malthus T. R., 1798. An essay on the principle of population: or, A view of its past and present effects on human happiness. London, UK.

Marre-Cast L., Vall E., 2013. Stratégies et trajectoires des exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina-Faso, in : Séminaire DP Asap, Plateformes d'innovation et intensification écologique, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 15 p.

Maxime F., Mollet J.M., Papy F., 1995. Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture. Cahiers Agricultures 4, 351-362.

Mazoyer M., Roudart L., 1997. Histoire des agricultures du monde, du néolithique à la crise contemporaine. Le Seuil, Paris, pp. 545.

McIntire J., Powell J.M., 1995. African semi-arid agriculture cannot grow without external inputs. In: Powell, J.M., Fernandez- Rivera, S., Williams, T.O., Renard, C. (Eds.), Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa. Vol. II: Technical Papers. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia.

Meentemeyer V., 1989. Geographical perspectives of space, time, and scale. Landscape Ecology 3: 163-173.

Mérot A., Bergez J.E., Capillon A., Wéry J., 2008. Analysing farming practices to develop a numerical, operational model of farmers' decision-making processes: An irrigated hay cropping system in France. Agricultural Systems 98: 108-118.

Milleville P., 1989. Activités agropastorales et aléa climatique en région sahélienne. In : ORSTOM, Le risque en agriculture, Paris, 233-241.

Milleville P., Serpantié G., 1994. Intensification et durabilité des systèmes agricoles en Afrique Soudano-Sahélienne. In : FAO, CTA, CIRAD, « Promotion des systèmes agricoles durables dans les pays d'Afrique soudano-sahélienne », Dakar, Senegal, 33-49.

Mladenoff, D., 2004. Landis and forest landscape models. Ecological Modelling, 180 :7-19.

Moran P., 1991. Caractérisation de la fragilité écologique et des potentialités agronomiques de la région de Hounde au Burkina Faso : Utilisation de différentes techniques de Diagnostic. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique De Lorraine.

Morère JL, Pujol R, 2003. Dictionnaire raisonné de biologie. Paris : Frison-Roche.

Morel J., Bégué A., Todoroff P., Martiné J. F., Lebourgeois V., Petit M. (2014). Coupling a sugarcane crop model with the remotely sensed time series of FIPAR to optimise the yield estimation. European Journal of Agronomy 61 : 60-68.

Muetzelfeldt R., Massheder J., 2003. The simile visual modelling environment. European Journal of Agronomy 18 :345-358.

N

National Research Council, 2013. Advancing Land Change modeling : opportunities and research requirements. The national academies of science, Washington DC.

Ndiaye M., Robin N., 2010. Les migrations internationales en Afrique de l'Ouest: Une dynamique de régionalisation articulée à la mondialisation. University of Oxford, International Migration Institute, IMI Working Paper 23.

NEPAD, 2013. Les Agricultures Africaines - Transformations et perspectives. New-York , Etats-Unis, pp. 72.

O

A. Olioso, Y. Inoue, J. Demarty, J.P. Wigneron, I. Braud, S. Ortega-Farias, P. Lecharpentier, C. Ottlé, J.P. Calvet, and N. Brisson. Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and svat models. In José A. Sobrino, editor, Symposium RAQRS : Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Valencia, 16-20 Sept 2002.

O'Neill R.V., Johnson A.R., King A.W., 1989. A hierarchical framework for the analysis of scale. Landscape Ecology 3: 193-205.

O'Neil RV, Hunsaker CT, Timmins SP, Jackson, BL, 1996. Scale problems in reporting landscape pa

terns at the regional scale. *Landscape Ecology* 11: 169–180.

O'Neill RV, 2001. Is it time to bury the ecosystem concept? (with full military honours, of course!). *Ecology* 82 : 3275-84.

Overmars K.P., Verburg P.H., 2006. Multilevel modelling of land use from field to village level in the Philippines. *Agricultural Systems* 89, 435–456.

P

Palliere A., 2013. Au-delà de Malthus et Boserup: comprendre les dynamiques agroécologiques d'un territoire. *JCEA 2013 : Rencontre nationale des jeunes chercheurs en études africaines*, France.

Papy F., 2008. Le système de culture : un concept riche de sens pour penser le futur. *Cahiers Agricultures* 17(3): 263-269.

Peterson D.L., Parker V.T., 1998. Ecological scale: theory and applications, *Complexity in Ecological Systems*. Columbia University Press, New York.

Pierye W, Dabire I., Barbier B., Savadogo K., 2009. Evaluation ex-ante de la prévision saisonnière en petit paysannat burkinabé. *Atelier régional CIRAD-CIRDES*. pp. 17.

PNUD, 2015. Rapport sur le développement humain 2015. Le travail au service du développement humain. Washington DC, Etats-Unis, pp.37.

Proisy C., Degenne P., Anthony E., Berger U., Blanchard E., Fromard F., Gardel A., Olagoke A., Santos V.F., Walcker R., Lo Seen D., 2016. A multiscale simulation approach for linking mangrove dynamics to coastal processes using remote sensing observations. , *International Coastal Symposium 2016 Crowne Plaza Coogee Beach*, Sydney, Australia, 6 - 11 March 2016.

R

Ramankutty N., Evan A. T., Monfreda C., Foley J. A., 2008. Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22.

Rastetter R.A., King A.W., Cosby B.J., Hornberger G.M., O'Neill R.V., Hobbie J.E., 1992. Aggregating fine-scale ecological knowledge to model coarse-scale attributes of ecosystems. *Ecological Applications* 2, 55–70.

Reboul C., 1976. Mode de production et système de culture et d'élevage. *Economie Rurale* 112 : 55-65.

Rémy G., 1981. Les Mossi à la rencontre de la grande brousse (région de Dédougou, Haute-Volta). In : *Les phénomènes de frontière dans les pays tropicaux*. IHEAL (34) , Paris, France, 117-131.

RGA, 2007. Méthodologie du recensement général de l'agriculture. Ministère de l'agriculture de l'hydraulique et des ressources halieutiques Burkina Faso.

RGPH, 1996. Recensement Général de la Population et de l'Habitation. Institut National de la Statistique et de la Démographie, Burkina Faso.

RGPH, 2006. Recensement Général de la Population et de l'Habitation. Institut National de la Statistique et de la Démographie, Burkina Faso.

Richardson, A.J., Wiegand, C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 43, 1541–1552.

Rouse, J., Haas, R., Schell, J., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *Texas A M Univ.* 1–8.

Rykiel E. J., 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological modelling* 90(3): 229-244.

S

Savonnet G., 1986. Évolution des pratiques foncières dans le Bwamu méridional. Crousse B., Le Bris E., Le Roy E.,(éd.), *Espaces disputés en Afrique noire. Pratiques foncières locales*, Paris, Karthala, 265-280.

Seaquist J.W., Hickler T., Eklundh L., Ardo J., Heumann B.W., 2009. Disentangling the effects of climate and people on Sahel vegetation dynamics. *Biogeosciences* 6: 469–477.

Sebillotte M., 1974. Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cahiers de l'ORSTOM* 24 : 3-25.

Sebillotte M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In : L. Combe et D. Picard coord., *Les systèmes de culture*. Inra, Versailles : 165-196.

- Sebillotte M., Soler L.G., 1990. Les processus de décision des agriculteurs : acquis et questions vives. , in: J. Brossier, Vissac, B., Lemoigne, J.L. (Ed.), Modélisation systémique et systèmes agraires, INRA Paris : 93-102.
- Seo S. N., Mendelsohn R., 2008. An analysis of crop choice: Adapting to climate change in South American farms. *Ecological economics* 67(1) : 109-116.
- Serpantié G., 2003. Persistance de la culture temporaire dans les savanes cotonnières d'Afrique de l'Ouest : étude de cas au Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Institut national agronomique Paris-Grignon.
- Serpantié G., Papy F., Doré T., 2007. Diversité des exploitations et utilisation de la jachère dans la zone cotonnière du Burkina Faso. In Gafsi, M., Dugué, P., Jamin, J.-Y., Brossier, J., (eds), Exploitations agricoles familiales en Afrique de l'Ouest et du Centre. Éditions Quae., 173–182.
- Schaller N., 2011. Modélisation des décisions d'assolement des agriculteurs et de l'organisation spatiale des cultures dans les territoires de polyculture-élevage. Thèse de Doctorat, AgroParisTech.
- Schwartz A., 1997. Des temps anciens à la dévaluation du franc CFA, les tribulations de la culture du coton au Burkina Faso. In *Annales de géographie*, Armand Colin, 288-312
- Stéphanne N., Lambin E.F., 2001. A dynamic simulation model of land-use changes in Sudano-sahelian countries of Africa (SALU). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 85 : 145–161.
- Stott A., Haines-Young R. (1998). Linking land cover, intensity of use and botanical diversity in an accounting framework in the UK. In *Environmental accounting in theory and practice*, Springer Netherlands, 245-260.
- Sumberg J., 2003. Toward a dis-aggregated view of crop–livestock integration in Western Africa. *Land use policy* 20(3) : 253-264.
- T**
- Tallet B., 2007. A l'arrière des fronts pionniers, recompositions territoriales dans l'Ouest du Burkina Faso et le Sud du Veracruz (Mexique). HDR, Université de Paris 1 Pantheon-Sorbonne, volume 3/3.
- Tassin J., 2012. Un agrosystème est-il un écosystème ? *Cahier Agricultures* 21 : 57-63.
- Tersiguel P. 1995. Le pari du tracteur. La modernisation de l'agriculture cotonnière au Burkina Faso. ORSTOM éditions. Collection « A travers champs », Paris.
- Tilman D., Fargione J., Wolff B., D'Antonio C., Dobson A., Howarth, R; et al., 2001. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* 292(5515) : 281-284.
- Traoré S.B., Ali A., Tinni S.H., Samake M., Garba I., Maigari I., Alhassane A., Samba A., Diao M.B., Atta S., Dieye P.O., Nacro H.B., Bouafou K.G.M., 2014. AGRHYMET: A drought monitoring and capacity building center in the West Africa Region. *Weather and Climate Extremes* 3: 22–30.
- Tucker C.J., 1979. Red and Photographic Infrared linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127–150.
- Turner M., 1995. The sustainability of rangeland to cropland nutrient transfer in semi-arid West Africa: ecological and social dimensions neglected in the debate. In: Powell, J.M., Fernandez- Rivera, S., Williams, T.O., Renard, C. (Eds.), *Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa*. Vol. II: Technical Papers. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia.
- Turner II B. L., Lambin E. F., Reenberg A., 2007. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 : 20666-20671
- V**
- Vall E., Dugué P., Blanchard M., 2006. Le tissage des relations agriculture-élevage au fil du coton. *Cahier Agricultures* 15 (1) : 72-79.
- Vall E., Diallo A., Fako Ouattara B., 2015 De nouvelles règles foncières pour un usage plus agroécologique des territoires en Afrique de l'Ouest. *Sciences Eaux et Territoires* 16.
- Van Ittersum, M.K., Ewert, F., Heckeley, T., Wery, J., Alkan Olsson, J., Andersen, E., Bezlepkina, I., Brouwer, F., Donatelli, M., Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A.E., van der Wal, T., Wien, J.E., Wolf, J., 2008. Integrated assessment of agricultural systems – a component-based

- framework for the European union (SEAMLESS). *Agricultural Systems* 96: 150–165.
- Van Keulen H., Breman H., 1990. Agricultural development in the west African Sahelian region: a cure against land hunger? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 32: 177–197.
- Vancutsem, C., Pekel, J.-F., Kayitakire, F., 2011. Dynamic mapping of cropland areas in Sub-Saharan Africa using MODIS time series. 2011 6th Int. Work. Anal. Multi-temporal Remote Sensing Images 25–28.
- Veldkamp A., Kok K., De Koning G.H.J., Schoorl J.M., Sonneveld M.P.W, Verburg P.H., 2001. Multi-scale system approaches in agronomic research at the landscape level. *Soil Tillage Research* 58: 129–140.
- Veldkamp, A. and Fresco, L., 1996. Clue-cr: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological Modelling*, 91 :231–248.
- Verburg P.H., Veldkamp A., 2001. The role of spatially explicit models in land-use change research: a case study for cropping patterns in China. *Agriculture Ecosystems and Environment* 85 : 177–190.
- Verburg, P., Soepboer, W., Limpiada, R., Espaldon, M., Sharifa, M., and Veldkamp, A., 2002. Modelling the spatial dynamics of regional land use: The clue-s model. *Environmental Management*, 30: 391–405.
- Verburg P.H., Schot P., Dijst M., Veldkamp A., 2004. Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61 (4): 309–324.
- Verburg P.H., Martz O., Erb K.H, Haberl H., Wu W., 2013. Land system change and food security: towards multi-scale land systems solutions. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5: 494–502.
- Vintrou E. 2012a. Cartographie et caractérisation des systèmes agricoles au mali par télédétection à moyenne résolution spatiale. Thèse de Doctorat, AgroParisTech.
- Vintrou E., Desbrosse A., Bégué A., Traoré S., Baron C., Lo Seen D., 2012. Crop area mapping in West Africa using landscape stratification of MODIS time series and comparison with existing global land products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14 : 83–93.
- Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenco J., Melillo J.M., 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science* 277 (5325): 494–499.
- Vlek P.L.G., Le Q.B., Tamene L., 2010. Assessment of land degradation, its possible causes and threat to food security in Sub-Saharan Africa, in: *Food Security and Soil Quality*. CRC Press, 57–86.
- Von Neumann J., 1966. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Champaign, IL, USA.
- ## W
- Weiss G., 1999. *Multiagent Systems, A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- Weiss M., Troufleau D., Baret F., Chauki H., Prévot L., Olioso A., Bruguier N., and Brisson N., 2001. Coupling canopy functioning and radiative transfer models for remote sensing data assimilation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108: 113–128.
- Wessels K., Prince S.D., Malherbe J., Small J., Frost P., VanZyl D., 2007. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability ? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environments* 68: 271–297.
- Wilensky, U., 1999. NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>).
- Wood E. C., Tappan G. G., Hadj A., 2004. Understanding the drivers of agricultural land use change in south-central Senegal. *Journal of Arid Environments* 59(3) : 565–582.
- ## Y
- Youl S., Barbier B., Moulin C.H ,Manlay R., Botoni E., Masse D., Hien V., Feller C., 2008. Modélisation empirique des principaux déterminants socioéconomiques de la gestion des exploitations agricoles au Sud-Ouest du Burkina Faso. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 12(1): 9–21.
- Yun J.I., 2003. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-

growth modelling, *Agricultural Systems* 77, 23–38.

Z

Zermeo A., 2015. Etude des dynamiques et de la variabilité spatiale des paysages en zone cotonnière du Burkina Faso par analyse d'images satellite. Mémoire de Master, Université de Rennes 2, France.

Ziegler B.P., Praehofer H., Kim G. T., 2000. Theory of modeling and simulation. Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems. Elsevier Science (USA), pp.485.

Annexes

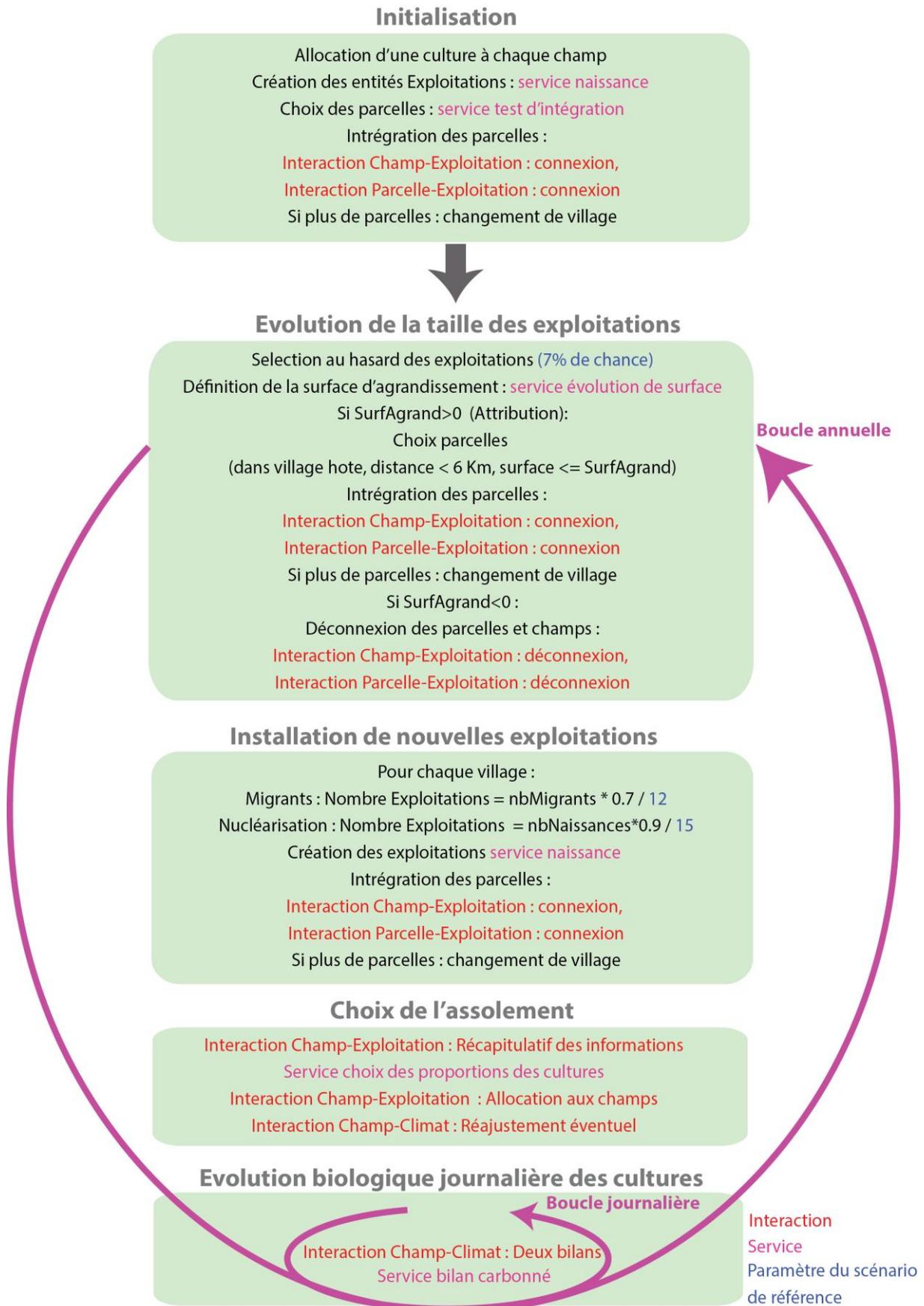


Annexe 1 : Structure du modèle

L'annexe suivante présente en détails le contenu du modèle. Un premier schéma présente le scénario de référence et l'ordre avec lequel il fait appel aux différents services et relations. Ces derniers sont ensuite présentés en 2^{ème} et 3^{ème} parties.

Dans les articles 1 et 2, des scénarios alternatifs ont été développés, ce qui a consisté à changer la valeur de paramètres ou modifier la structure du scénario de référence. Un tableau en 4^{ème} partie présente les spécificités de chacun de ces scénarios alternatifs.

1. Scénario de référence



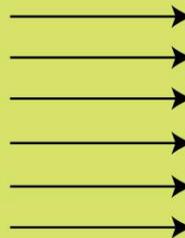
2. Services



Naissance

Choix du type :

- Agriculteur 1 (25 % de chances)
- Agriculteur 2 (25 % de chances)
- Agro-éleveur 1 (15 % de chances)
- Agro-éleveur 2 (15 % de chances)
- Eleveur 1 (10 % de chances)
- Eleveur 2 (10 % de chances)



Choix de la surface au hasard dans un intervalle :

- 4 ha < Surface < 13 ha
- 10 ha < Surface < 25 ha
- 6.5 ha < Surface < 15 ha
- 15 ha < Surface < 50 ha
- 4 ha < Surface < 10 ha
- 4 ha < Surface < 10 ha



Test d'intégration

Pour la première parcelle de l'exploitation :

si surface parcelle < surface exploitation et qu'elle n'appartient pas à une zone en défens
et qu'elle n'est pas trop pentue :

alors sélection de la parcelle et choix du centre de la parcelle comme barycentre de l'exploitation.

Pour les parcelles suivantes :

si surface parcelle < surface restante exploitation

et si distance parcelle-barycentre exploitation < 5 km

alors sélection de la parcelle et calcul du nouveau barycentre de l'exploitation.



Evolution de surface

Surface d'évolution = surface*57%



Bilan carboné

Bilan carboné (équations issues de SARRA-H)



Choix proportions

OBJECTIF 1

Si type d'exploitation est agriculteur 1: Surface jachère = $\text{surface} * 0.36 * \text{random}()$
Si type d'exploitation est agriculteur 2: Surface jachère = $\text{surface} * 0.52 * \text{random}()$
Si type d'exploitation est agro-éleveur 1: Surface jachère = $\text{surface} * 0.04 * \text{random}()$
Si type d'exploitation est agro-éleveur 2: Surface jachère = $\text{surface} * 0.1 * \text{random}()$
Si type d'exploitation est éleveur : Surface jachère = 0

Surfaces maïs = entre 5% et 15% de la surface totale.

Si type d'exploitation est agro-éleveur 2 : Surface coton = 2 fois la surface maïs
Sinon, surface coton = entre 0 et 2 fois la surface maïs

Surface arachide = 50% de probabilité d'allouer entre 5 et 35% de surface totale
Surface niébé = si pas d'arachide : 5 à 25% de la surface totale
Surface sorgho = 50% de probabilité d'allouer entre 0 et 30% de la surface totale
Surface Mil = si pas de sorgho : entre 0 et 30% de la surface totale

OBJECTIF 2

Si l'entreprise cotonnière fait la promotion du coton et qu'un projet assure la promotion du sésame, alors les surfaces restantes auront 50% de probabilités d'être allouées à l'une ou l'autre des deux cultures.

Si l'entreprise cotonnière fait la promotion du coton et qu'il n'y a pas de projet promouvant le sésame, alors :

- les agro-éleveurs alloueront toutes les surfaces restantes au coton
- Les autres types de systèmes de production choisiront leurs surfaces en fonction du seuil dérivé du prix et de la diffusion. Le seuil (S) détermine la probabilité qu'ils auront d'implanter la moitié des surfaces restantes en coton et de partager le reste entre sorgho et maïs (probabilité = S) ;
ou de ne pas faire de coton quoi qu'il arrive (probabilité = 1 - S).

Si l'entreprise cotonnière ne fait pas la promotion du coton et qu'il y a des projets promouvant le sésame, alors :

- si le prix normalisé du coton est supérieur à 0.5,
l'agriculteur mettra du sésame sur les surfaces restantes dans 15% des cas,
du coton dans 45% des cas
et du maïs dans 30%.
- si le prix normalisé du coton est inférieur à 0.5,
le prix normalisé de sésame détermine la probabilité que l'agriculteur aura d'implanter les surfaces restantes en maïs, en sorgho ou en sésame.

Si l'entreprise cotonnière ne fait pas la promotion du coton et qu'il n'y a pas de projets de promotion du sésame, alors, le prix normalisé du coton détermine la probabilité que l'agriculteur a d'implanter les surfaces restantes en coton, maïs ou sorgho.

3. Relations



Connexion

Attribution de la parcelle à l'exploitation
Attribution du champ à l'exploitation



Déconnexion

Abandon de la parcelle par l'exploitation
Abandon du champ par l'exploitation



Récapitulatif des informations

Synthèse propriétés de chaque champ par l'exploitation (culture, age jachère, surface, age parcelle)



Allocation

Allocation des espèces cultivées aux champs en respectant trois règles :

1. Rotations prioritaires :
 - coton-maïs
 - coton-légumineuses ou maïs-légumineuses
 - pas de rotation
2. Pas d'arachide sur les sols sableux
3. Jachère en priorité sur les parcelles en jachère depuis moins de 3 ans, puis sur les parcelles en culture depuis le plus longtemps



Réajustement éventuel

Si la saison est tardive, pour chacune de ses parcelles en coton, l'agriculteur aura 33% de probabilités de remplacer le coton par du maïs, 33% de probabilités de laisser la parcelle en coton, 33% de probabilités de remplacer le coton par du sésame.



Deux bilans

Phénologie (équations issues de SARRA-H)
Bilan hydrique (équations issues de SARRA-H)



Relation Exploitation-Champs



Relation Exploitation-Parcelles



Relation Climat-Champs

4. Variations des paramètres et processus entre les différents scénarios

Article	Scénario	Variation par rapport au scénario de référence
1	Parcelles groupées	Distance parcelle-barycentre de l'exploitation : 1 km
1	Jachère longue	Pour tous les types d'exploitations, surface jachère = entre 20 et 50% de la surface totale Paramètre durée de jachère : 10 ans
1	Pas de fertilisant à crédit	Paramètre fertilisation ¹ : diminué d'un rang pour les agriculteurs et les agro-éleveurs.
2	Tests de sensibilité des facteurs de déforestation	Nombre d'exploitations de migrants = 0 ou Nombre de parcelles choisies pour l'agrandissement = 0 ou Nombre d'exploitations par nucléarisation = 0
2	Les exploitants tiennent compte des caractéristiques des parcelles pour s'agrandir	Ajout d'un paramètre dans le choix des parcelles : note d'attractivité de la parcelle (la note est fixée en fonction des propriétés du sol, de la localisation, de la pente et de l'appartenance à une zone en défens)
2	Défriches sans possibilité d'échange de terre avec les villages voisins	Désactivation du processus de choix de parcelle « si plus de parcelle, changement de village »

¹ Paramètre issu de la calibration du modèle SARRA-H. Le taux de fertilisation est séparé en quatre groupe : très faible, faible, bonne, très bonne (F1,F2,F3,F4). Dans le modèle, ces taux de fertilisation sont répartis aléatoirement, selon le type d'exploitation (les éleveurs auront du F3 ou F4, les agriculteurs du F1 ou F2 par exemple). Le scénario alternatif de diminution de l'apport en fertilisation a constitué à faire changer les fertilisations de rang (F4 devenait F3).

Annexe 2 : Données d'entrée du modèle

Data type	Organisation level	Support units	Temporal resolution	Source
Population	Village	village	Decade	RGPH 1996, RGPH 2006
Price	National	Province	Year	Services de l'Agriculture
Soil	Plot	1 km ²		BDOT, 2007
Roads	Province			BDOT, 2007
Rainfall	Climatic zone	4 km	Day For 2000 to 2015	TAMSAT
Other meteorological data	Climatic zone	Province (around 5000 km ²)	Day	Experimental meteorological station of Farako Ba (INERA-CIRAD)
Farm type, strategies	Farm	Farm	Period between the year of installation and 2013	Typology described in Marre-Cast and Vall (2013)
cropping practices	Farm	Farm		Crop monitoring in 6 villages 180 fields Year 2014-2015
Years of crop promotions by companies	Province	Province	Year	Field surveys
Year 2000 crop/non-crop area classification with plot structure	Plot (Annual crops/ Natural vegetation/ Urban area/ laterite/water)	Province	Year 2000	Landsat7 archive images of April and November 2000 Spot5 image of January 2014

Annexe 3 : Données indépendantes utilisées pour l'étalonnage et la vérification

Product	classes	Source
Year 2007 crop/non-crop area classification	Annual crops/ Natural vegetation/ laterite/water	Landsat 5 archive images of February and October 2007
Year 2014 crop/non-crop area classification	Annual crops/ Natural vegetation/ laterite/water	Landsat 8 archive images of April and October 2014
Gridded Changes map between 2007 and 2000	Natural vegetation progression/ Natural vegetation regression/ No changes	crop/non-crop area classifications of 2007 and 2000
Gridded Changes map between 2014 and 2000	Natural vegetation progression/ Natural vegetation regression/ No changes	crop/non-crop area classifications of 2014 and 2000
Crops proportions between 2000 and 2011	Maize/ cotton/ sorghum/ mil/ peanut/ bean	AGRHYMET
Crops proportions between 2012 and 2013	Maize/ cotton/ sorghum/ mil/ peanut/ bean/sesame/ fallows	Pleiades 2012,2013
Crops yields	Maize/sorghum/yields	Crop monitoring 2014-2015

Annexe 4 : Travail de terrain et guides d'entretiens

1. Organisation du travail de terrain

La grande majorité des processus modélisés est issue de l'analyse des données obtenues au terme d'un travail de terrain de 3 mois et demi.

Les villages enquêtés ont été choisis de manière à représenter la diversité spatiale de la zone d'étude (figure 71).

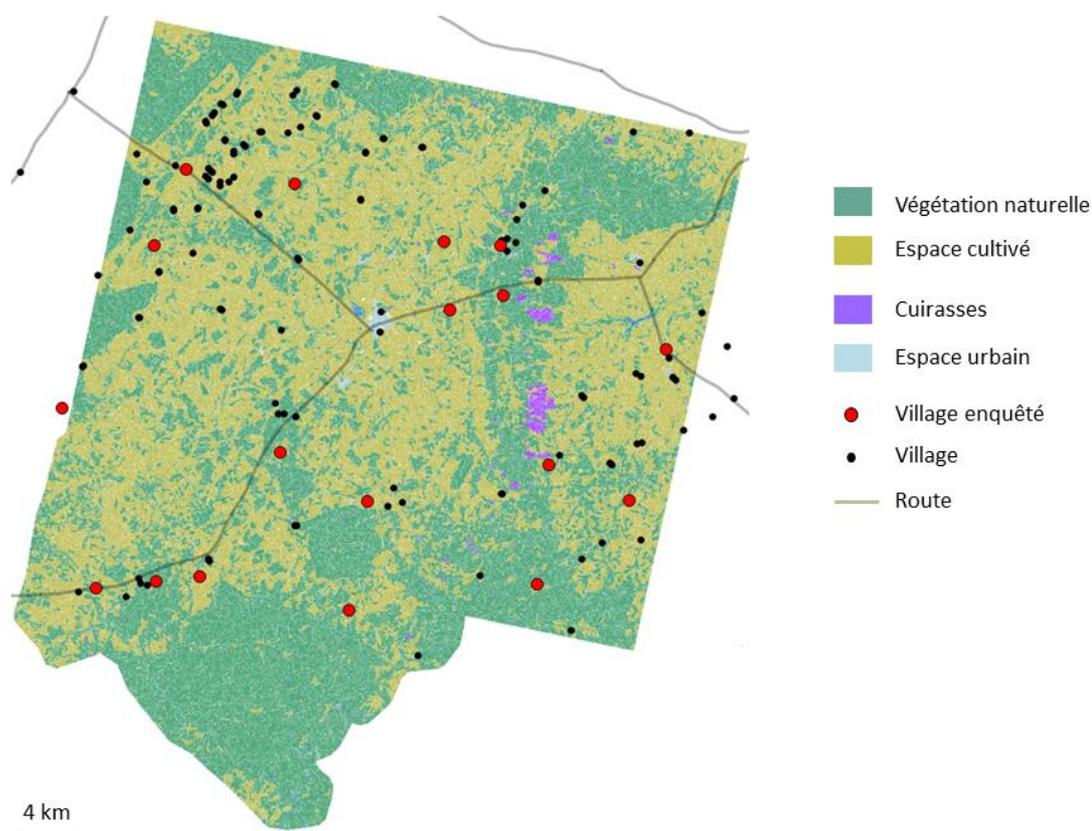


Figure 71: Localisation des villages enquêtés.

Les enquêtes ont ainsi eu lieu dans 18 villages. Un traducteur était la plupart du temps requis. Durant toute cette phase de terrain, j'étais hébergée dans 4 villages différents (Koumbia, Dimikuy, Boni, Founzan) depuis lesquelles j'ai pu rayonner pour atteindre les villages à proximité.

Plusieurs types d'enquêtes ont été menés :

- des entretiens collectifs : réalisés dans les 18 villages. Ils portaient sur l'identification des changements à l'échelle du village et permettaient de se présenter auprès des notables (chef du village, chef des groupements villageois, chef de terre, chefs des lignages...) et de

demander l'autorisation de continuer les enquêtes. Chacun des entretiens collectifs duraient entre 2 et 4h.

- des entretiens individuels: réalisés auprès de 50 agriculteurs, ils portaient sur le fonctionnement des exploitations et les changements à l'échelle de l'exploitation. Chaque entretien durait entre 1 et 5 heures (certains entretiens ont été plus approfondis, abordant en détail l'historique de l'exploitation).
- des entretiens individuels auprès d'autres acteurs: ils ont permis de croiser les informations obtenues au cours des enquêtes précédentes avec la vision d'acteurs travaillant dans la zone sur les problématiques agricoles. Les acteurs interrogés ont été les agents techniques de l'agriculture, l'Union des Producteurs de Coton et la Sofitex.

2. Guides d'entretiens

Les entretiens réalisés étaient de type semis-directifs : ils étaient structurés autour de plusieurs grandes questions la plupart du temps ouvertes, et la discussion évoluait ensuite librement selon la réponse de l'enquêté. Il s'agissait en effet moins pour ce travail de créer des bases de données exhaustives décrivant la structure des exploitations que de comprendre des mécanismes et processus décisionnels. Ce type d'enquête a ainsi permis de laisser une grande liberté de réponse à l'enquêté pour ne pas risquer d'omettre des facteurs importants dans la compréhension des dynamiques agraires. C'est pourquoi les guides d'entretien présentés sont succincts, n'étant constitués que des questions conductrices communes à tous les entretiens.

Entretiens collectifs

Sans support :

- Quels ont été les changements marquants depuis 2000?
- Identification d'une année particulière ?

Présentation d'une image Landsat du village datée de 2014 (déchiffrement collectif de l'image):

- Organisation spatiale du village (à l'aide de l'image)?
- Localisation des changements depuis 2000 ?

Confrontation avec une image Landsat datant de l'année 2000.

Entretiens individuels

Caractéristiques structurelles de l'exploitation :

- Champs, jachères, terres en réserve : surface, cultures et localisation

- Animaux
- Matériel
- Travailleurs et bouches à nourrir

Trajectoire de l'exploitation :

- Contexte et date de l'installation
- Grandes étapes dans l'évolution de l'exploitation
- Historique de l'évolution du parcellaire et des cultures (réalisé pour une 10aine d'entretiens)

Choix des assolements :

- Deux dernières années détaillées/ facteurs et circonstances décisionnelles
- Retour sur grandes étapes d'évolution de l'exploitation
- Scénarios fictifs (évolution des prix, scénarios climatiques...)

3. Restitutions

Une phase de restitution des résultats de ce travail de terrain a ensuite été réalisée. Les restitutions se sont déroulées sur 2 jours et ont eu lieu dans 5 villages (Dimikuy, Boni, Founzan, Koumbia et Gombeledougou). Tous les agriculteurs enquêtés de la zone ont été conviés. Chaque restitution a rassemblé entre 15 et 30 personnes.

Chaque restitution s'est déroulée en deux temps :

- restitution des analyses de traitement du travail de suivi des cultures (réalisé par Gerald Nana, en stage au CIRAD)
- restitution des tendances de changement observées à l'échelle de la province du Tuy et des exploitations.

Après chacune des restitutions, il a été demandé aux agriculteurs de valider, inférer ou compléter ces résultats, ce qui a à chaque fois donné lieu à des débats.

Title : Analysis of the agrarian dynamics of agro ecosystems by spatial modelling and satellite images' processing, the case study of Burkina Faso.

Keywords : Modelling, graphs, agro-ecosystems, Burkina Faso, agrarian dynamics, remote sensing.

Abstract :

Rural areas of West Africa have seen notable transformations these last two decades, mainly due to high population growth, development policies in favor of export crops and introduction of new cropping practices. The results of these developments are a pressure on forestry resources, an evolution of farming systems, a depletion of soils and a saturation of cultivated areas. The number of conflicts for resources access increases, reviving buried ethnical tensions, and the question of food security is raised. In that context, early warning systems have been developed in order to foresee and curb food insecurity by the mean of hazard analyses.

The present work deals with agrarian changes and their mechanisms, in the context of early warning systems development. New methodological approaches are explored, based on modeling and remote sensing in order to create a retrospective and prospective analysis of agrarian dynamics of the Tuy province, located in West Burkina Faso.

We first focus on the issue of cross-scaling in agro-ecosystems dynamics models, by building a multi-scalar model of past developments. The model uses interaction graphs to simulate processes occurring from the plot scale to the regional scale (crop production, crop rotation and crop area expansion). We show that modelling across scales is achievable without resorting to methods of aggregation or disaggregation, usually applied for this type of study.

The model is then used to analyze two aspects of agrarian dynamics of Tuy province. The first one deals with clearances dynamics in the context of Malthus vs Boserup debate, concerning the impacts of demographic growth on natural resources. Prospective scenarios are simulated and their consequences on natural vegetation surfaces are assessed: these scenarios simulate emigrations of a part of the population towards other areas, the implementation of protected areas, a demographic regulation and an ecological intensification of farming systems.

The second aspect concerns decisional processes of farmers in order to constitute their crops rotations. The study consists in understanding the important variations of cultivated species, observed during the studied period, by analyzing the simulated weight evolution of different determining factors involved in the decisional processes.

Finally, we show that anthropic processes footprints are explicitly detectable in remote sensing images, by using multi-scalar simulations of the model developed. Then, we create an assimilation of satellite data in the model in order to re-calibrate it and reinforce its abilities to reproduce past dynamics. This last part opens important perspectives concerning the joint use of remote sensing data and agro-ecosystems dynamics.

Titre : Analyse des dynamiques des agroécosystèmes par modélisation spatialisée et utilisation d'images satellitaires, cas d'étude de l'ouest du Burkina Faso.

Mots clés : Modélisation, graphes, agroécosystèmes, Burkina Faso, dynamiques agraires, télédétection.

Résumé :

L'organisation des territoires ruraux d'Afrique de l'Ouest a été bouleversée ces vingt dernières années par des changements rapides, dus à un accroissement démographique sans précédent, à des politiques favorisant les cultures d'exportation et à l'introduction de nouvelles techniques culturales. On assiste aujourd'hui à une mutation des structures d'exploitation, une pression sur les ressources forestières, un épuisement des sols et une saturation de l'espace cultivé. Les tensions pour l'accès aux ressources se multiplient, faisant souvent ressurgir d'anciens conflits ethniques, et la question de la sécurité alimentaire se pose. Dans ce contexte, des systèmes d'alerte précoce ont été mis en place dans le but d'anticiper et d'endiguer l'insécurité alimentaire par l'analyse des risques de catastrophe.

La thèse s'inscrit dans le cadre de ces systèmes d'alerte précoce et traite de l'étude des changements agraires et de leurs mécanismes. Elle se propose d'explorer de nouvelles pistes méthodologiques, basées à la fois sur la modélisation et la télédétection, pour réaliser une analyse rétrospective et prospective des dynamiques agraires de la province du Tuy, située à l'ouest du Burkina Faso.

Nous abordons tout d'abord la question du croisement d'échelles dans les modèles de dynamiques des agroécosystèmes en développant un modèle multiscalaire des évolutions passées. Le modèle utilise les graphes d'interaction pour simuler des processus allant de l'échelle de la parcelle à l'échelle régionale (évolution des rendements, évolution des assolements, déforestation). Nous montrons ainsi qu'il est possible d'effectuer un croisement d'échelles dans un modèle sans avoir recours aux méthodes d'agrégation ou de désagrégation habituellement employées pour ce type d'étude.

Le modèle est ensuite utilisé pour analyser deux aspects des dynamiques agraires de la province du Tuy. Le premier aborde les dynamiques de défriche, d'abord analysées à la lumière du débat Malthus-Boserup qui porte sur l'impact de la croissance démographique sur les ressources naturelles. Des scénarios prospectifs sont simulés et leurs conséquences sur les surfaces en végétation naturelle sont évaluées : ces scénarios simulent l'émigration d'une partie de la population vers d'autres régions, la création de zones protégées, la mise en place de politiques démographiques et la conversion progressive des systèmes de production à l'agro-écologie.

Le second aspect concerne les processus décisionnels des agriculteurs pour constituer leurs assolements. L'étude consiste plus précisément à comprendre les importantes variations des surfaces allouées aux différentes cultures, observées au cours de la période étudiée, via l'analyse de l'évolution simulée du poids des différents facteurs intervenant dans la prise de décision.

Dans une dernière partie, nous montrons qu'il est possible de détecter explicitement des empreintes de processus anthropiques dans les images de télédétection en utilisant les simulations multiscalaires du modèle développé. Nous réalisons ensuite une assimilation de l'information satellitaire dans le modèle, pour le ré-étalonner et ainsi renforcer ses capacités à reproduire les dynamiques ayant eu lieu. Cette dernière partie ouvre d'importantes perspectives concernant l'utilisation conjointe de l'information satellitaire et des modèles de dynamiques des agroécosystèmes.