



HAL
open science

Modélisation multi-agents et pluri-niveaux de la réorganisation du cycle de l'azote dans des systèmes agro-sylvo-pastoraux en transition - Le cas du bassin arachidier au Sénégal

Myriam Grillot

► **To cite this version:**

Myriam Grillot. Modélisation multi-agents et pluri-niveaux de la réorganisation du cycle de l'azote dans des systèmes agro-sylvo-pastoraux en transition - Le cas du bassin arachidier au Sénégal. Science des productions animales. Montpellier SupAgro; Université de Montpellier, 2018. Français. NNT : . tel-02917359

HAL Id: tel-02917359

<https://hal.inrae.fr/tel-02917359>

Submitted on 19 Aug 2020

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.

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

En Sciences Agronomiques

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau
Portée par l'Université de Montpellier

Unité de recherche 112- Systèmes d'Elevage Méditerranéens et Tropicaux (SELMET)

MODELISATION MULTI-AGENTS ET PLURI-NIVEAUX DE LA REORGANISATION DU CYCLE DE L'AZOTE DANS DES SYSTEMES AGRO-SYLVO-PASTORAUX EN TRANSITION

LE CAS DU BASSIN ARACHIDIER AU SENEGAL

Présentée par Myriam GRILLOT

Le 16 mars 2018

Sous la direction de Dominique MASSE
et encadrement de Jonathan VAYSSIERES

Devant le jury composé de

Charles-Henri MOULIN, Dr, Supagro
Rémy COURDIER, Pr, Université de la Réunion
Katrien DESCHEEMAEKER, Dr, Wageningen university
Dominique MASSE, Dr, IRD
Jonathan VAYSSIERES, Dr, CIRAD

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Invité



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



La joie est en tout, il suffit de savoir l'extraire.

Confucius

Modélisation multi-agents et pluri-niveaux de la réorganisation du cycle de l'azote dans des systèmes agro-sylvo-pastoraux en transition : Le cas du bassin arachidier au Sénégal

Résumé

Les systèmes agro-sylvo-pastoraux (SASP) d'Afrique de l'Ouest sont des agro-écosystèmes limités en biomasses et en nutriments. Le recyclage des nutriments et les transferts de fertilité sont traditionnellement rythmés par la **mobilité des troupeaux de ruminants** conduits en extensif. Les agro-éleveurs pratiquent le parcage nocturne de leurs troupeaux pour concentrer la matière organique, dans les champs à proximité des habitations afin de sécuriser une production vivrière suffisante à leurs besoins. Dans un contexte de croissance démographique et de réduction des parcours naturels au profit des zones cultivées, le système d'élevage « traditionnel », basé sur une forte mobilité intra-terroir villageois, est remis en cause. Les stratégies adoptées par les agro-éleveurs sont, soit (i) l'éloignement des troupeaux du terroir villageois pendant des périodes plus ou moins longues par des pratiques de **transhumance** saisonnière vers des régions moins peuplées et disposant de davantage de ressources fourragères ; soit (ii) plus récemment, des pratiques d'**intensification** avec des animaux gardés à l'étable au sein du terroir villageois et nourris avec des aliments concentrés, achetés sur le marché local. Ces changements de systèmes d'élevage ont possiblement des conséquences importantes sur les flux de biomasses et les cycles des nutriments au niveau du ménage et du territoire. Il convenait de les évaluer en termes d'impacts sur le fonctionnement et la durabilité des SASP.

A cet effet, le **modèle multi-agents** TERROIR a été développé et implémenté sur la plateforme de modélisation GAMA. Il simule l'effet de changements dans l'organisation du paysage et des systèmes d'élevage sur les flux de biomasse et d'azote aux **différents niveaux d'organisation** du territoire : la parcelle, le troupeau, le ménage et le terroir villageois. Le modèle simule les échanges de biomasses entre une centaine de ménages comportant des stratégies et des pratiques différentes. Cela inclut les transferts spatiaux de biomasses orchestrés par plusieurs centaines de troupeaux se déplaçant de façon indépendante sur un millier de parcelles. Le modèle synthétise ces flux par un ensemble d'indicateurs issus de deux méthodes d'analyse (« Ecological Network Analysis » et « System Gate Balance ») pour décrire la structure, le fonctionnement et la durabilité de l'agroécosystème, en termes de productivité, d'efficacité, d'autonomie, de recyclage, de transferts spatiaux et de bilan de nutriments. Le modèle a été conçu et paramétré à partir des données disponibles sur les agroécosystèmes de savane en Afrique de l'Ouest et il a été évalué à partir des données observées dans deux terroirs villageois du bassin Arachidier au Sénégal où les pratiques des agro-éleveurs sont particulièrement contrastées.

Le modèle TERROIR a été utilisé pour explorer les impacts des dynamiques territoriales observées sur la période 1920-2015 dans le bassin Arachidier au Sénégal, une zone agricole à transition agraire rapide et avancée. Les résultats soulignent une réorganisation du cycle de l'azote et une tendance générale à l'intensification des flux et à l'augmentation de la dépendance des agroécosystèmes vis-à-vis de sources extérieures de nutriments. Cependant, le recyclage et les transferts spatiaux de nutriments internes aux agrosystèmes restent à des niveaux élevés. L'**intégration sol-plantes-animaux-hommes** et l'**hétérogénéité spatiale** de la répartition des ressources fertilisantes apparaissent comme deux **propriétés persistantes** des agro-écosystèmes étudiés. Consolider cette intégration et cette organisation spatiale seraient ainsi un gage pour la durabilité des futurs systèmes agricoles qui émergeront dans un contexte de poursuite de la forte croissance démographique et de changement climatique.

Mots clefs : systèmes agriculture-élevage ; cycle des nutriments ; hétérogénéité spatiale ; Afrique de l'Ouest ; transition agraire

Multi-agent and multi-level modelling of the nitrogen cycle reorganization in agro-sylvo-pastoral systems in transition: the case of the groundnut basin in Senegal

Abstract

Agro-sylvo-pastoral systems (*systèmes agro-sylvo-pastoraux* - SASP) of West Africa are agroecosystems limited in biomass and nutrients. Nutrient recycling and fertility transfer are traditionally driven by the **mobility of ruminant herds** led in extensive practices. Agro-pastoralists practice night corralling of their herds to concentrate the organic matter in the fields near the houses, in order to secure a sufficient food production for their needs.

In a context of demographic growth and the reduction of natural rangelands in favor of cultivated areas, the "traditional" mobile livestock system, based on high mobility within the village is being called into question. The strategies adopted by the agro-pastoralists are: (i) keeping the herds away from the village for periods of varying lengths, by seasonal **transhumance** in less populated regions where forage resources are more important, or (ii) more recently, intensified practices with animals kept in the barn within the village and fed with concentrate feeds, bought on the local markets. These changes in livestock systems may have important consequences for biomass flows and nutrient cycling at the household and village landscape level. There was a need to assess their impact on the functioning and sustainability of SASP.

To this end, the TERROIR **multi-agent model** has been developed and implemented on the GAMA modeling platform. It simulates the effect of changes in the organization of the landscape and livestock systems on biomass and nitrogen flows at **different levels of organization** in the village: plot, herd, household, village landscape. The model simulates the exchanges of biomasses between dozens of households with different strategies and practices. It includes the spatial transfers of biomasses between several hundred plots orchestrated by dozens of herds moving independently. The model synthesizes these flows with a set of indicators from two methods of analysis (Ecological Network Analysis and System Gate Balance) to describe the structure, functioning and sustainability of the agroecosystem, in terms of productivity, efficiency, autonomy, recycling, spatial transfers and nutrient balance. The model was designed and configured with available data on savannah agroecosystems in West Africa. It was evaluated from data observed in two villages of the Groundnut Basin in Senegal where the practices of agro-pastoralists are particularly contrasted.

The TERROIR model was developed and implemented to explore the impacts of the village dynamics observed over the period 1920-2015 in the Groundnut Basin in Senegal, an agricultural zone in fast and advanced agrarian transition. The results highlight a reorganization of the nitrogen cycle and a general trend towards increased flows and increased dependence of agroecosystems on external sources of nutrients. However, the recycling and spatial transfers of nutrients internal to agroecosystems remain at high levels. The **soil-plant-animal-human integration** and the **spatial heterogeneity** of the distribution of fertilizing resources appear as two **persistent properties** of the studied agro-ecosystems. Consolidating this integration and spatial organization could guarantee for the sustainability of future farming systems that will emerge in a context of continued high-population growth and climate change.

Key words: crop-livestock systems; nutrient cycling; spatial heterogeneity; West Africa; agrarian transition

Préambule

Institutions et financements

Cette thèse a été financée par l'Agence Nationale de la Recherche française (ANR) dans le cadre du Projet ANR-13-AGRO-002, **CERAO**, Programme Agrobiosphère. Le projet CERAO (CERéales sèches en Afrique de l'Ouest) s'intitule : « Auto-adaptation des agro-socio-écosystèmes tropicaux face aux changements globaux ? Etude à long terme en vue d'une intensification écologique de la production de céréales dans les zones de savanes en Afrique de l'Ouest » (plus d'infos sur : <http://www.agence-nationale-recherche.fr/Projet-ANR-13-AGRO-0002>).

Le Centre pour la coopération Internationale pour la Recherche Agronomique et le Développement (CIRAD) a entièrement financé cette thèse, et plus particulièrement l'Unité Mixte de Recherche **Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux** (UMR 112 – SELMET), dont la direction est assurée par Alexandre Ickowicz (<https://umr-selmet.cirad.fr/>). Les frais liés au fonctionnement de la thèse, c'est-à-dire à la formation doctorale, à l'expatriation, aux déplacements sur le terrain (enquêtes, restitution, etc.) et à la participation à des conférences internationales ont été pris en charge par le CIRAD.

La thèse s'est déroulée à Dakar, au Sénégal. Elle s'inscrit dans le cadre des activités du **Dispositif en Partenariat Pôle Pastoralisme et Zones Sèches** (DP PPZS ; <https://www.ppzs.org/>), réunissant un ensemble de partenaires : l'Institut de Recherche Sénégalais (ISRA), l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD), le Centre de Suivi Ecologique (CSE) et le CIRAD. La doctorante a été accueillie dans les locaux de l'ISRA et de l'Institut de Recherche et Développement (IRD) dans le cadre de collaborations entre le DP PPZS et le Laboratoire Mixte International Intensification Ecologique des Sols Cultivés en Afrique de l'Ouest (LMI IESOL).

Cadre de recherche

Cette thèse intègre une grande partie des connaissances et résultats produits dans le cadre des travaux de recherche menés dans le bassin arachidier par l'encadrant de la thèse, Jonathan Vayssières :

1. Sur la gestion des flux de biomasses

Cinq stages de niveau master :

- **Balandier M-L.**, (Vayssières J., Grillot M.), 2017. Describing diversity and crop-livestock integration in smallholder mixed farming systems in Sub-Saharan Africa - An application of network analysis in the former Senegalese Groundnut Basin. Mémoire de Master II WUR, Wageningen, 38 p.
- **Dugy T.**, (Masse D., Vayssières J.), 2016. Diagnostic des flux de biomasse à l'échelle de terroirs agro-sylvo-pastoraux – Etude comparative des terroirs de Sob, Sasse et Barry Sine dans l'Ancien Bassin Arachidier au Sénégal. Mémoire de Master II ISTOM, Cergy-Pontoise, 82 p.
- **Saunier-Zoltobroda T.**, (Vayssières J., Masse D.), 2015. Flux de biomasse à l'échelle du paysage et hétérogénéité spatiale des bilans azotés - cas de trois terroirs du bassin Arachidier au Sénégal. Mémoire de Master II ISTOM, Cergy-Pontoise, 63 p.
- **Audouin E.**, (Vayssières J., Masse D.), 2013. Terroirs comparison in terms of biomass flows and nitrogen balance - Study case of Diohine and Barry Sine in the former groundnut basin of Senegal. MSc Thesis, Norwegian University of Life Sciences, Aas, 92 p.
- **Odrú M.**, (Vayssières J., Dugué P., Masse D.), 2013. Flux de biomasse et renouvellement de la fertilité des sols à l'échelle du terroir. Etude de cas d'un terroir villageois Sereer au Sénégal. Mémoire de Master II ISTOM, Cergy-Pontoise, 99 p.

2. Sur les mécanismes biophysiques régissant le cycle de l'azote

Trois stages de niveau master :

- **Thiam A. S.**, (Clermont-Dauphin C.; Vayssières J., Ben Ari T.), 2018. Modélisation empirique de la production de Mil en zones sèches d'Afrique de l'Ouest par méta-analyse. Mémoire ingénieur ENSA, Thiès, 60 p.
- **Wade C.**, (Vayssières J., Thiam M.B.), 2016. Suivi du cycle de l'azote (N) en milieux paysans : Cas des systèmes agropastoraux du bassin arachidier du Sénégal. Mémoire ingénieur ENSA, Thiès, 68 p.
- **Grange G.**, (Vayssières J., Thiam M.B.), 2015. Suivi du cycle de l'azote en fermes réelles – cas des systèmes agropastoraux du bassin arachidier du Sénégal. Mémoire de Master II SupAgro, Montpellier, 48 p.

3. Sur l'évolution paysagère

Un rapport de consultance :

- **Ndiaye M.L., Soti V., Vayssières J., Masse D.**, 2016. Analyse par télédétection de la dynamique d'occupation du sol dans trois terroirs villageois du vieux bassin arachidier au Sénégal sur la période 1968-2016. Rapport CIRAD, IRD, CSE, Dakar, Sénégal, 59 p.

4. Sur la modélisation multi-agents des flux de biomasses à l'échelle du territoire

Un stage de niveau master sur la mobilité des troupeaux et des systèmes d'élevage extensifs :

- **Sané M.**, (Vayssières J., Gillot M., Bah A.), 2015. Un système multi-agents pour simuler la distribution spatiale des apports de fumure organique par les troupeaux de bovins en terroir villageois agro-pastoral. Mémoire de Master II Recherche Systèmes Complexes (Syscom), UCAD, Dakar, 46 p.

Un stage de niveau master sur les flux entre zones agro-écologiques au Sénégal :

- **Diouf E.G.**, (Vayssières J., Grillot M.), 2017. Un modèle de simulation des flux de biomasses d'origine agricole entre zones agro-écologiques à l'échelle nationale: le cas du Sénégal. Mémoire de Master II Recherche Systèmes Complexes (Syscom), UCAD, Dakar, 57 p.

Manuscrit et productions scientifiques durant le doctorat

Pour le manuscrit de cette thèse nous avons retenu le principe de la thèse sur articles. Selon les cas, les publications sont en français ou en anglais. L'introduction générale, les transitions, la discussion générale, ainsi que la conclusion générale sont en français. Les productions associées à la thèse sont les suivantes :

- **3 articles dans des revues à facteur d'impact :**

Grillot, M., Vayssières J., Guerrin F., Lecomte P., 2018. Modélisation conceptuelle de la gestion adaptative de la biomasse face à l'aléa climatique en système agro-sylvo-pastoral. Cahiers Agricultures (soumis 01/2018 ; chez l'éditeur).

Grillot, M., Guerrin, F., Gaudou, B., Masse, D., Vayssières, J., 2018. Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model. Soumis à Environmental Modelling & Software (04/2017 ; en 2^{nde} relecture).

Grillot, M., Vayssières, J., Masse, D., 2018. Agent-based modelling as a time machine to assess nutrient cycling reorganization during past agrarian transitions in West Africa. Soumis à Agricultural Systems (09/2017 ; en révision).

- **4 communications à des conférences internationales :**

Grillot, M., Vayssières, J., Masse, D., 2017. Persistent properties of agro-silvo-pastoral systems in West Africa, in: P2CG: Le Pastoralisme Dans Le Courant Des Changements Globaux. Dakar.

Grillot, M., Vayssières, J., Gaudou, B., Bah, A., 2016. An agent-based model to analyze the ecological functioning of agro-silvo-pastoral landscapes in West Africa, in: IEMSS 8th: International Congress on Environmental Modelling and Software. Toulouse, France.

Grillot, M., Vayssières, J., Balandier, M.-L., Lecomte, P., Masse, D., 2016. Ecological network analysis of nitrogen cycles at the landscape level: intensive versus extensive crop-livestock systems in the Senegalese groundnut basin, in: Ecosummit 2016. Presented at the 5th international ecosummit: Ecological Sustainability Engineering Change, Montpellier, France.

Grillot, M., Vayssières, J., Bourgoïn, J., Bah, A., Jankowski, F., Lalou, R., Masse, D., 2015. Participatory modelling of the trajectories of agro-silvo-pastoral systems at landscape and community levels in West Africa – the case of Senegalese groundnut basin, in: FSD5: International Symposium on Farming System Design. Montpellier, France.

- **1 modèle multi-agents :**

Grillot, Myriam (2017). "TERRoir level Organic matter Interactions and Recycling model" (Version 1.3.0). CoMSES Computational Model Library. <https://www.openabm.org/model/5608/version/3/view>

- **Appui et encadrement de trois stages de master :**

Balandier M.-L., (Vayssières J., Grillot M.), 2017. Describing diversity and crop-livestock integration in smallholder mixed farming systems in Sub-Saharan Africa - An application of network analysis in the former Senegalese Groundnut Basin. Mémoire de Master II WUR, Wageningen, 38 p.

Diouf E.G., (Vayssières J., Grillot M.), 2017. Un modèle de simulation des flux de biomasses d'origine agricole entre zones agro-écologiques à l'échelle nationale : le cas du Sénégal. Mémoire de Master II Recherche Systèmes Complexes (Syscom), UCAD, Dakar, 57 p.

Sané M., (Vayssières J., Grillot M., Bah A.), 2015. Un système multi-agents pour simuler la distribution spatiale des apports de fumure organique par les troupeaux de bovins en terroir villageois agro-pastoral. Mémoire de Master II Recherche Systèmes Complexes (Syscom), UCAD, Dakar, 46 p.

Tables des matières

Résumé.....	3
Abstract	4
Préambule	5
Institutions et financements	5
Cadre de recherche	5
Manuscrit et productions scientifiques durant le doctorat	7
Tables des matières.....	8
Liste des figures.....	11
Liste des tableaux.....	12
Liste des annexes.....	14
Remerciements	15
Liste des sigles et abréviations	17
1 Introduction : pourquoi analyser la dynamique des cycles de nutriments des systèmes agro-sylvo-pastoraux sur plusieurs décennies ?	18
1.1 Caractéristiques des systèmes agro-sylvo-pastoraux.....	18
1.1.1 Importance et définition des systèmes mixtes agriculture-élevage	18
1.1.2 Cas des systèmes agro-sylvo-pastoraux (SASP) soudano-sahéliens.....	19
1.1.3 Systèmes agro-sylvo-pastoraux « traditionnels »	19
1.2 Systèmes agro-sylvo-pastoraux en transition en Afrique de l’Ouest	21
1.2.1 Les déterminants de l’évolution des SASP.....	21
1.2.2 Evolution des SASP traditionnels.....	22
1.2.3 Flux de nutriments pour l’intensification écologique des SASP	23
1.3 Problématique et hypothèses	24
1.4 Choix méthodologiques.....	25
1.4.1 Point sur l’azote en tant que nutriment limitant	25
1.4.2 Couplage de deux modèles conceptuels	25
1.4.3 Recours à la modélisation multi-agents	27
1.4.4 Simulation de SASP variés dans une même zone d’étude	30
1.5 Démarche générale et structure du manuscrit	33
2 Chapitre 1 : Modélisation de la gestion de la matière organique en systèmes agro-sylvo-pastoraux	35
2.1 Résumé	36
2.2 Abstract	37
2.3 Introduction.....	38
2.4 Matériel et méthodes.....	39
2.4.1 Cas d’étude	39
2.4.2 Identification et quantification des flux de biomasses.....	39
2.4.3 Typologie de ménages et extraction du modèle d’action	39

2.5	Modèle d'action.....	40
2.5.1	Calendrier et ajustement des dates de début et de fin des activités agricoles	40
2.5.2	Conséquences des ajustements sur l'importance des flux de biomasses.....	41
2.5.3	Utilisation d'arbres de décision	42
2.6	Discussion	43
2.6.1	Conséquences de l'aléa pluviométrique sur les opérations techniques et les flux.....	43
2.6.2	Sensibilité des ménages aux variations environnementales.....	44
2.6.3	Pertinence d'un modèle d'action prévoyant des ajustements	44
2.7	Conclusion	45
2.8	Remerciements.....	45
3	Chapitre 2 : Description et évaluation du modèle multi-agents pour la simulation du fonctionnement et de la durabilité des SASP	46
3.1	Abstract	47
3.2	Graphical abstract : model structure.....	47
3.3	Highlights	48
3.4	Software availability	48
3.5	Introduction.....	49
3.6	Description of the model.....	50
3.6.1	Overview.....	50
3.6.2	Design concepts.....	55
3.7	Model implementation.....	58
3.7.1	Simulating two contrasted villages.....	58
3.7.2	Simulation results	59
3.8	Discussion	62
3.8.1	Model evaluation.....	62
3.8.2	Advantages of the model.....	64
3.8.3	Further uses.....	65
3.9	Conclusion	65
3.10	Supplementary material: The TERROIR model detailed description including equations and parameters 67	
3.10.1	General information on the model.....	67
3.10.2	Model variables and parameters.....	69
3.10.3	Details on the household decision model	78
3.10.4	Details on the biophysical processes.....	88
4	Chapitre 3 : Réorganisation du cycle de l'azote dans les SASP résultant d'une transition agraire	96
4.1	Abstract	97
4.2	Highlights	97
4.3	Introduction.....	98
4.4	Materials and methods.....	99

4.4.1	The TERROIR agent-based model	99
4.4.2	Case study in the Senegalese groundnut basin	100
4.4.3	Scenario and trajectory construction	101
4.5	Agro-sylvo-pastoral system structure and simulation results	102
4.5.1	Changes in the agro-ecosystem structure and in household diversity in the trajectories.....	102
4.5.2	Agro-sylvo-pastoral system functioning: ecological network indicators.....	104
4.5.3	Agro-sylvo-pastoral system functioning: spatial nutrient transfers.....	106
4.5.4	Agro-sylvo-pastoral system performances.....	108
4.6	Discussion	110
4.6.1	Reorganization of the N cycle explained by changes in farming practices	110
4.6.2	The benefits of a multi-level analysis of N flows	110
4.6.3	Strength and limits of the modelling approach.....	111
4.7	Conclusion	113
5	Chapitre 4 : Discussion générale	114
5.1	Dynamiques du cycle de l'azote et identification de propriétés écologiques persistantes dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux du bassin arachidier.....	114
5.1.1	Intensification des flux d'azote et réorganisation du cycle de l'azote	114
5.1.2	Maintien du recyclage et de l'hétérogénéité spatiale.....	117
5.1.3	Interactions entre les ménages et flux d'azote inter-ménages.....	119
5.2	Un modèle réutilisable pour étudier les SASP en zone sahélo-soudanienne.....	121
5.2.1	Caractéristiques génériques des SASP représentées dans le modèle TERROIR.....	121
5.2.2	Vers l'application du modèle TERROIR pour étudier d'autres SASP sahélo-soudaniens	125
5.2.3	Vers un modèle d'évaluation multicritères	128
5.3	Dynamiques d'intensification des systèmes agro-sylvo-pastoraux dans le contexte régional ouest-africain 130	
5.3.1	Dynamiques d'intensification en cours en zone sahélo-soudanienne	130
5.3.2	Principales contraintes à l'intensification écologique des SASP par les activités d'élevage ...	134
5.3.3	Vers une utilisation du modèle pour de faire de la prospective	136
6	Conclusion générale	138
	Bibliographie.....	140
	Annexes	155

Liste des figures

Figure 1. Représentation schématique d'un terroir agro-sylvo-pastoral en Afrique de l'Ouest en 4 unités paysagères.....	20
Figure 2. Les déterminants de l'évolution des systèmes mixtes agriculture-élevage (Williams et al., 1999)	21
Figure 3. Schéma explicatif de la diminution de l'effectif de bovins extensifs (Lhoste, 1987).....	23
Figure 4. Modèle conceptuel de flux d'azote dans les SASP entre activités agricoles	26
Figure 5. Modèle conceptuel de flux d'azote dans les SASP entre unités paysagères	26
Figure 6. Terminologie en modélisation (Refsgaard and Henriksen, 2004)	27
Figure 7. Arbre de décision pour le choix de la méthode de modélisation appropriée au problème (Kelly et al., 2013)	28
Figure 8. Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement (Ferber, 1995).29	
Figure 9. Localisation de l'observatoire de Niakhar au Sénégal	31
Figure 10. Evolution de la pluviosité de 1920 à 2016 à Bambey	31
Figure 11. Localisation des trois villages étudiés dans l'observatoire de Niakhar	32
Figure 12. Structure du manuscrit	34
Figure 13. Evolution du prix de denrées alimentaires et de la pluviosité au Sénégal.....	35
Figure 14. Calendrier des activités agricoles et ajustement des dates de début et de fin des activités.....	41
Figure 15. Impacts d'une année pluvieuse (gauche) et une sèche (droite) sur les modèles stock-flux des ménages.....	42
Figure 16. Arbre de décision pour le choix de l'origine et de la quantité Q de fourrages apportés aux animaux.....	43
Figure 17. Class diagram of the TERROIR model and its agent parameters.....	51
Figure 18. The six entities of the model, sorted according to their organizational level and their mobility	52
Figure 19. General sequence of actions sorted according to the time scale on which they are performed in the TERROIR model: daily, weekly or annually	55
Figure 20. Example of spatial grids generated by the model: two village landscape representations characterized by different structures	58
Figure 21. A typical seasonal calendar and periods for technical operations simulated in the model..	70
Figure 22. Initialization diagram	70
Figure 23. Household decision diagram for manure target choice (process of spreading manure).....	80
Figure 24. Activity diagram: sowing crops	82
Figure 25. Activity diagram: harvest crop products (left side) and crop co-products (right side)	83
Figure 26. Forage targeted quantities according to livestock herd management	86
Figure 27. Concentrate feeds need for fattening herds and draft animals	87
Figure 28. Update tree pruning intensity.....	89
Figure 29. The various statuses for the agricultural plot agents	90
Figure 30. Water limited yield determination	91
Figure 31. Livestock decision tree for corral choice (process updateCorral)	94
Figure 32. Measured rainfall variability and data used as input data for each simulated scenario	101
Figure 33. Landscape structure and share of land units (from the center outwards: homestead areas, home fields, bush fields, rangelands) in the 7 scenarios covering the 3 trajectories studied (traditional, transhumant and fattening).....	103
Figure 34. Farming diversity and share of household types (livestock subsistence, crop-subsistence, livestock market, crop market) in the 7 scenarios covering the 3 trajectories studied	103

Figure 35. Proportion of land use types in the cultivated areas (home fields and bush fields) in the 7 scenarios covering the 3 trajectories studied	104
Figure 36. Simulated functioning indicators describing crop-livestock integration at village and household levels	105
Figure 37. Simulated functioning indicators describing spatial heterogeneity at land unit level	107
Figure 38. Simulated performance indicators at village landscape, household and plot levels	109
Figure 39. Evolution des flux d'azote entre les compartiments agricoles des SASP dans les 7 scénarios simulés avec le modèle TERROIR (1920 à 2010)	115
Figure 40. Evolution de l'intégration agriculture-élevage (Steinfeld, 1998 in Powell et al. 2004)	132
Figure 41. Relation hypothétique entre l'intensité agricole ou potentiel agro-écologique et l'importance des résidus de récolte dans l'alimentation des troupeaux (d'après Tifton et al. (2015))	133
Figure 42. Transition agraire (Jouve, 2006)	134
Figure 43. Example of spatial distribution of land plot partial N balances for the 5 th year of a simulation for Vext and Vint	156
Figure 44. Simulated functioning indicators for each farming activity landscape level	157
Figure 45. Visualisation centrée par compartiments pour lesquels l'intensité et l'organisation des flux d'N a évolué	158
Figure 46. Visualisation centrée sur le compartiment biophysique (flux issus de la fixation de l'N et des pertes dues au lessivage et à la volatilisation)	159
Figure 47. Visualisation centrée par compartiments pour lesquels l'intensité et l'organisation des flux d'N a peu évolué : humain à gauche et grenier à droite	160
Figure 48. Part des types de biomasses dans l'alimentation des troupeaux (en matière sèche) dans les 3 trajectoires étudiées (traditionnelle, transhumante et embouche)	161
Figure 49. Part des types de unités paysagères dans l'alimentation des troupeaux (en matière sèche) dans les 3 trajectoires étudiées (traditionnelle, transhumante et embouche)	161
Figure 50. Part des types de biomasses dans l'alimentation fourragère des troupeaux (en matière sèche) dans les 3 trajectoires étudiées (traditionnelle, transhumante et embouche)	162
Figure 51. Part des unités paysagères dans l'alimentation fourragère des troupeaux (en matière sèche) dans les 3 trajectoires étudiées (traditionnelle, transhumante et embouche)	162
Figure 52. Evolution de la part des biomasses dans l'alimentation fourragère des troupeaux (en matière sèche) au cours d'une année pour le scénario ScTrad	163
Figure 53. Part des types de biomasses dans la fertilisation azotée des parcelles dans les 3 trajectoires étudiées (traditionnelle, transhumante et embouche)	164

Liste des tableaux

Les tableaux sont notés « Table » ici étant donné qu'ils sont majoritairement situés dans les articles rédigés en anglais.

Table 1. Principales activités menées pour réaliser la thèse	33
Table 2. Caractéristiques structurelles des 4 types de ménage	40
Table 3. Typical input parameters for the structure of the 4 types of households represented in the model based on data surveys in the study area (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2016)	53
Table 4. Input parameters of the two simulated villages (Vext, Vint)	58
Table 5. N partial balances and N recycling efficiencies in 2013 based on field (FD) and simulation (Sim) data	59
Table 6. Structure parameters observed in the field (FD) and simulated by the model (Sim)	60

Table 7. Simulated N partial balances and N recycling efficiencies in 2013 for an extensive village (Vext) and an intensive village (Vint) at village, household and compartment levels	62
Table 8. Biomass types dealt with in the model	67
Table 9. Global parameters: default values	69
Table 10. Global parameters related to model periods.....	69
Table 11. Land plots (i.e. housing and agricultural plots) constant parameters	71
Table 12. Land plot (i.e. housing and agricultural plots) variables and time scales	72
Table 13. Agricultural plot variables and time scales (as variation frequency)	73
Table 14. Land uses and possible corresponding land units.....	74
Table 15. Household types in the model	74
Table 16. Household agent constant parameters.....	74
Table 17. Household initialization: livestock attribution to CS households (n = 92 households)	75
Table 18. Household initialization: livestock attribution to CM households (n = 14 households)	75
Table 19. Household initialization: livestock attribution to LS households (n = 5 households)	75
Table 20. Household initialization: livestock attribution to LM households (n = 3 households)	75
Table 21. Agricultural plot initialization: cropping plans according to land units and types of cropping management	75
Table 22. Household variables and time scales	76
Table 23. Livestock herd constant parameters.....	76
Table 24. Livestock herd variables and time scales	77
Table 25. Initialization: livestock forage need (kgDM/TLU/day)	77
Table 26. Initialization: livestock concentrate feeds need (kgDM/TLU/day)	77
Table 27. Level of implication of the household types in the farming activities	78
Table 28. Mineral fertilizer quantity per type of household	80
Table 29. Mineral fertilization objectives according to land use and household type (subsistence versus market-oriented).....	81
Table 30. Nitrogen losses per type of fertilizer at application.....	81
Table 31. Crop parameters: sowing activities.....	82
Table 32. Quantity of residues left in the field for each household type	82
Table 33. Home consumption parameters	84
Table 34. Food needs and kitchen waste production.....	84
Table 35. Daily forage quantities targeted for Bovine and Small Ruminants.....	87
Table 36. Daily forage quantities targeted for Equine.....	87
Table 37. Modelled tree production (<i>Faidherbia albida</i>) according to different pruning intensities	88
Table 38. Parameters related to tree pruning and tree nitrogen fixation.....	89
Table 39. Land use products, co-products and cycle duration	90
Table 40. Percentage of N mineralized of organic fertilizer N applied (%).....	92
Table 41. Nitrogen fixation parameters.....	93
Table 42. Minimum and maximum quantity of N input as a fertilizer and associated yields	93
Table 43. Parameters for fresh grass growth	94
Table 44. Grazing livestock biomass preferences	95
Table 45. Livestock excretion rates.....	95
Table 46. The output indicators chosen to describe the functioning and performances of the village terroir in this paper.....	100
Table 47. Points clés pour représenter des systèmes mixtes agriculture-élevage.....	123
Table 48. Caractéristiques des SASP sahélo-soudaniens prises en compte dans le modèle TERROIR.	126
Table 49. Paramètres d'entrée du modèle requis pour les différents types de ménage.....	127

Liste des annexes

Annexe 1. Calendrier du déroulement général de la thèse.....	155
Annexe 2. Exemples de distribution spatiale des bilans azotés pour deux SASP simulés.....	156
Annexe 3. Indicateurs de fonctionnement simulés au niveau du terroir pour les trois trajectoires étudiées.....	157
Annexe 4. Représentation des flux d’N entre les compartiments « activité agricole » au cours de la transition.....	158
Annexe 5. Gestion de la biomasse pour l’alimentation des troupeaux.....	161
Annexe 6. Gestion de la biomasse pour l’alimentation fourragère des troupeaux	162
Annexe 7. Gestion de la biomasse pour la fertilisation azotée des parcelles	164
Annexe 8. Photographies relatives à la gestion de l’alimentation des troupeaux dans le bassin arachidier du Sénégal.....	165
Annexe 9. Photographies relatives à la gestion de la matière organique dans le bassin arachidier du Sénégal.....	167

Remerciements

Il est plutôt agréable de penser que l'on a terminé un marathon, cela donne la sensation d'avoir accompli quelque chose. Ce travail de thèse est mon marathon. Une course qui n'aurait jamais eu lieu sans un minimum de préparation, ni sans le soutien technique et moral reçu tout au long de l'effort. Je souhaite remercier sincèrement toutes les personnes bienveillantes (consciemment ou non) qui ont participé à la réalisation et l'achèvement de cette thèse à chacune de ses étapes. Et surtout, Merci pour votre temps.

Jonathan Vayssières, mon encadrant a avant tout cru en moi et m'a donné ma chance. Merci pour toutes ces heures passées à t'investir dans cette thèse, ta motivation communicative et ton honnêteté.

Je remercie également Dominique Masse, mon directeur de thèse pour avoir été disponible et réactif, notamment dans les différentes phases de rédaction pour la mise en perspective du travail.

Soulignons aussi l'importance des ressources administratives qui m'ont bien aidée, notamment dans l'unité SELMET : Corine Chaillan, Marie-Jo Darcq, Corinne Fernandez et Gaëlle Rocafull. De plus, je remercie Alexandre Ickowicz, directeur de l'unité pour ses qualités d'écoute et de compréhension.

Pour revenir au sujet, si j'ai retenu que le « diable est dans les détails », c'est bien grâce à François Guerrin. Merci pour ta disponibilité, rigueur et les douces expressions de ta grand-mère.

Le modèle n'aurait sans doute pas abouti à ce que je souhaitais sans l'aide de Benoit Gaudou, merci beaucoup pour tes conseils et ton accueil à Toulouse. Merci également de m'avoir permis de rencontrer d'autres passionnés dans le labo MAGMA à Grenoble où j'ai été également très bien accueillie par Julie Dugdale et Carole Adam. Merci aussi de m'avoir mis en contact avec Etienne Delay, à la personnalité chaleureuse qui m'a aidée à mettre au clair le principe d'analyse de sensibilité.

Le passage « à la casserole » lors des comités de thèse a toujours été constructif et a participé à l'évolution de mes travaux, grâce à Jacques Wery mon référent auprès de l'école doctorale, Jérémy Bourgoïn, Frédérique Jankowski, Richard Lalou, Raphaël Manlay, Alassane Bah et j'y ajoute Philippe Lecomte, qui a toujours montré de l'intérêt pour ce travail. Pour ces mêmes raisons, je remercie les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail. En particulier, merci à Charles-Henri Moulin pour avoir présidé le jury et merci à mes rapporteurs, Rémy Courdier et Katrien Descheemaeker, pour votre temps et votre intérêt.

Concernant le travail de terrain, je remercie Fatou du village de Diohine pour avoir été plus qu'une traductrice lors de mon terrain. Merci à la famille Faye de m'avoir accueillie. C'était également un grand plaisir de venir chaque mois retrouver à Diohine les familles Marone de Jean-Baptiste, Faye de Jean-Marie, Ndiaye de Sandokh, à Barry la famille Faye de Daouda, et à Sob la famille Tine de Adama. Je tiens à saluer le travail réalisé par les différents étudiants (cités formellement dans le préambule) : Elise, Mariana, Théo, Thibault, Guylain et Coly.

Merci à Christian Corniaux pour m'avoir facilité le travail de terrain, notamment en me permettant de travailler avec Moustapha Dia. La logistique et le sourire étaient toujours assurés par Fatima Dembele, un plaisir ! Coté IRD, je remercie Laurent Cournac, Pourmera Gassama et Iba Ndiaye.

Merci à tous les collègues croisés à Montpellier dans les bureaux de SELMET et à Dakar au PPZS et LMI-IESOL qui m'ont aidée dans mes réflexions. Merci également aux directeurs régionaux du CIRAD, Denis Depommier et Sylvie Lewicki. Nous avons peu échangé mais à chaque fois je me suis sentie écoutée.

Pour remonter un peu dans le temps, si l'on peut être certain que je ne suis pas arrivée ici grâce au système d'orientation de l'enseignement secondaire, d'autres personnes et processus ont pour sûr participé à l'évolution de mon parcours : les enseignants du BTS Productions Animales du lycée Val de Sarthe et leur directeur monsieur De Lansalut, ainsi que l'ISTOM.

Surtout..., I know it all started in Ntobroso with my Sis' Annika; with my deep thanks to Bo & Willem-Albert from AgroEco. It continued in Mikocheni-Masaini, and I thank Gerbert and Joris from FTK and the people I met there for that. I learnt a lot by working with you all.

Pour leur apport plus personnel, je tiens à remercier mes parents. Maman pour m'avoir montré la force de la vie et Papa pour m'avoir montré qu'une balance cherche toujours un équilibre.

Habibou ! Rien que de penser à toi me donne envie de râler, mais après tout c'est aussi parce que tu sais toujours dire ce que je n'ai pas envie d'entendre. Tu es un sacré personnage, tu m'as beaucoup apporté et j'espère que ce n'est que le début.

Saluons la patience de ceux qui nous ont supportés dans le bureau : Marie-Laure, Esther, Mamadou et Maramé. Non seulement vous avez passé le test des collègues « horribles » mais en plus vous êtes des personnes intéressantes que j'ai pris plaisir à côtoyer. Je rajoute à l'équipe les autres étudiants du labo et en particulier Falilou et les filles, Rachel, Sophie, Bineta et Rokhaya.

Quelle vie agréable que d'avoir des voisins fort sympathiques dont on peut ~~kidnapper~~ garder chiens, chats et poissons ! Anouck et Raph vous m'aurez supportée sur toute la durée ! Margaux et Hamidou aussi, à la maison Bancal, il y a vraiment des gens bien.

Au quotidien mais sur des périodes plus courtes, c'était très enrichissant de partager des moments de vie avec Serena et Erin. Et « Pop », je n'oublie pas Bérénice la fameuse (et terrible). Charlotte, c'était un vrai bonheur de pouvoir te voir et t'appeler.

Quel plaisir de rencontrer puis retrouver régulièrement la troupe au PCH. Je ne me lance pas dans l'énumération elle serait trop longue mais je vous vois tous devant moi et vous embrasse. La « belle rencontre », comme tu l'appelles, Julie, tu es une fille super.

Mes passages à Montpellier ont été accueillis chaleureusement par les habitantes de la Gloriette, et aussi par Victoria et Anne. Merci les filles !

Mélanie, Merci pas besoin d'en dire plus. Vaiti et Seb vous m'avez tellement marquée que même absents vous étiez là.

Je garde une personne précieuse pour la fin, qui selon toute probabilité croit davantage en moi que je n'en suis capable (oui papa et maman je sais que vous aussi). Nicolas, merci d'être là et d'être toi.

Liste des sigles et abréviations

Sigle	Abréviation
ABM	agent-based model
ANOVA	analyse de variance
Dek	Sol sableux avec argile (Sereer)
Dior	Sol sableux sans argile (Sereer)
cf.	confer : se référer à
DM	dry matter
i.e.	<i>id est</i> : c'est-à-dire
e.g.	<i>exempli gratia</i> : par exemple
ex.	par exemple
g	Gramme
ha	Hectare
ENA	Ecological Network Analysis
kg	Kilogramme
TLU	Tropical Livestock Units
MS	Matière sèche
N	Azote (FR) ; Nitrogen (EN)
SASP	Système agro-sylvo-pastoral
SMA	Système multi-agents
SC	Surface cultivée
Sc	Scénario
t	Tonne
UBT	Unité Bovin Tropical
§	Paragraphe

1 Introduction : pourquoi analyser la dynamique des cycles de nutriments des systèmes agro-sylvo-pastoraux sur plusieurs décennies ?

1.1 Caractéristiques des systèmes agro-sylvo-pastoraux

1.1.1 Importance et définition des systèmes mixtes agriculture-élevage

A l'échelle mondiale, les systèmes mixtes agriculture-élevage produisent plus de 50% des céréales, plus de 60% de la viande de ruminants et 92% du lait consommé (Herrero et al., 2012). Dans les pays en développement où ils dominent, ils assurent la sécurité alimentaire et un revenu à une majorité de ménages ruraux (Herrero et al., 2010). Comme le définissent Seré et Steinfeld (1996), les systèmes **mixtes agriculture-élevage** sont des systèmes dans lesquels « au moins 10% de la matière sèche pour l'alimentation animale provient de coproduits végétaux de l'exploitation, ou plus de 10 % de la valeur des produits provient d'activités agricoles non liées à l'élevage ».

Dans les pays en développement notamment, la diversification des activités rend les systèmes flexibles¹ en leur permettant d'absorber et de s'adapter aux aléas environnementaux au sens large (ex. climatiques, de marchés, politiques, sanitaires) (Herrero et al., 2010). Le troupeau est une source de flexibilité des systèmes (Nozières et al., 2011) : il est un moyen de thésaurisation à court et moyen terme, permettant de répondre à des besoins monétaires exceptionnels (Duncan et al., 2013; Powell et al., 2004). De plus, dans les pays en développement, la traction animale est la principale source d'énergie pour le travail des champs. D'après une comparaison de Lhoste et al. (2010) à partir des données de la FAO pour le début des années 2000, dans les pays développés, 82% des champs sont cultivés avec un tracteur, contre 22% dans les pays en développement (hors Chine), pour lesquels la traction animale couvre 52% des besoins des surfaces cultivées.

Les systèmes mixtes agriculture-élevage peuvent être simplement diversifiés ou intégrés (FAO, 2001a). Dans les systèmes **diversifiés** les activités de production (culture, élevage) sont indépendantes. Au contraire, les systèmes **intégrés** visent un recyclage des coproduits d'une activité envers l'autre et réciproquement. Les effets positifs d'interactions entre agriculture et élevage sont particulièrement détaillés par Ryschawy et al. (2014). La biomasse échangée entre ces activités est au cœur du fonctionnement des systèmes. Par photosynthèse, la végétation produit de la biomasse primaire que les animaux digèrent accélérant ainsi le retour d'une part des nutriments aux plantes. Les résidus de cultures sont utilisés pour l'alimentation des animaux et, en échange, les animaux produisent de la matière organique pour la fertilisation des cultures. Les animaux sont à la fois consommateurs, transformateurs et producteurs de matière organique qu'ils déplacent éventuellement d'un endroit de l'espace à un autre, par consommation puis excréation.

Schiere et de Wit (1995) proposent une classification des systèmes agricoles. D'une part, ils présentent les systèmes en **expansion**, (*expansion agriculture*, EXPAGR), non contraints par la disponibilité de la terre. Ils se basent sur la mise en culture de nouvelles terres pour augmenter leur production. D'autre part, ils présentent les systèmes intégrés et les distinguent selon leur niveau d'intégration :

- Système très intégré, basé sur peu d'intrants extérieurs (low external input agriculture, LEIA) ;
- Système moins intégré, basé sur une forte part d'intrants extérieurs (high external input agriculture, HEIA) ;
- Système intermédiaire à LEIA et HEIA, basé sur l'ajustement des pratiques culturales en fonction des conditions locales (*new conservation agriculture*, NCA).

Cette classification a été réutilisée pour décrire des systèmes mixtes agriculture-élevage à l'échelle mondiale (Duncan et al., 2013; FAO, 2001a; Herrero et al., 2012), en France (Bonaudo et al., 2014; Ryschawy et al., 2012) et au Brésil (Bonaudo et al., 2014).

¹ Flexibilité au sens de Dedieu et Ingrand (2010) comme la capacité des systèmes de production à s'adapter aux changements.

1.1.2 Cas des systèmes agro-sylvo-pastoraux (SASP) soudano-sahéliens

En Afrique sub-saharienne, la majorité des systèmes d'élevage sont en grande partie mobiles et basés sur des pâturages ou des parcours pastoraux (Herrero et al., 2012). La mobilité des troupeaux de ruminants permet d'adapter l'alimentation des animaux aux variations importantes intra-annuelles de la disponibilité en ressources fourragères locales (Turner et al., 2014; Vigan et al., 2017). Cette mobilité varie de l'éleveur **nomade**, en mobilité constante sur des longues distances et dont les revenus sont majoritairement assurés par l'élevage, à l'éleveur **transhumant** dont les animaux sont mobiles une partie de l'année seulement, à l'**agro-éleveur** dont l'élevage mobile ne s'étend que rarement au-delà des limites du village (FAO, 2001b).

Herrero et al. (2008) ont localisé ces différents systèmes : on retrouve principalement des systèmes pastoraux nomades, dans la partie sahélienne au nord et plus l'on se rapproche de la zone soudanienne au sud, plus humide, et plus les systèmes tendent vers de l'agro-élevage, s'associant avec de l'agriculture pluviale.

Les **systèmes agro-pastoraux** sont des systèmes mixtes agriculture-élevage majoritaires dans la zone sahélo-soudanienne de l'Afrique de l'Ouest². Ce sont des systèmes très intégrés et qui utilisent peu d'intrants (type LEIA). Une partie des biomasses utilisées pour l'alimentation des animaux est gérée et utilisée collectivement, ex. végétation des parcours, résidus de cultures laissés sur les champs. La définition de Seré et Steinfeld (1996) (cf. 1.1.1) doit être adaptée ici en « systèmes basés sur les ressources locales » au lieu de « basés sur l'exploitation ».

Les arbres, et en particulier les *Faidherbia albida* (anciennement *Acacia albida*), sont une ressource fourragère complémentaire importante, notamment en période de soudure alimentaire (Chirat et al., 2014; Sarr et al., 2013). Les animaux pâturent les parcours qui sont des espaces communs dédiés en périphérie des villages. On parle donc ici de **système agro-sylvo-pastoral (SASP)**.

Le terme de **terroir** est généralement utilisé pour décrire l'espace occupé par ces SASP. En lien avec l'existence de ces espaces communs, et d'après la définition de Sautter (1962), il s'agit d'un « espace dont une **communauté** agricole, définie par des liens de résidence, tire l'essentiel de sa subsistance : autrement dit la portion de l'espace environnant où se localisent les champs et paît le bétail, dans la mesure où celui-ci se trouve associé d'une façon ou d'une autre à la culture ». Ce terme est encore d'actualité aujourd'hui (Bassett et al., 2007). Il est défini par Hervé et Castella (2009) comme un « espace géré localement, dans lequel s'appliquent des décisions individuelles et collectives ».

Le terme de **ménage agricole** est généralement préféré à celui de ferme ou exploitation agricole dans les sociétés paysannes en Afrique sub-saharienne. Dans ces sociétés, les ménages agricoles sont caractérisés par une main d'œuvre avant tout familiale, « l'absence de main d'œuvre salariée et par une production agricole destinée avant tout à la couverture des besoins alimentaires familiaux » (Delaunay et al., 2006). Le ménage est un groupe de personnes unies par la résidence et partageant la cuisine (consommation commune) ; du point de vue agricole, il s'agit de l'unité production et de gestion des activités pour le besoin commun (Guigou, 1999).

1.1.3 Systèmes agro-sylvo-pastoraux « traditionnels »

Traditionnellement dans les SASP ouest africains, les pratiques de fertilisation des sols se base sur des apports organiques soit (i) provenant des récoltes elles-mêmes (résidus de récolte), soit (ii) provenant de l'élevage (déjections, fumiers). Cette dernière pratique correspond à un recyclage de la biomasse produite dans les zones cultivées et non cultivées (i.e. parcours) du village, comme observé au Burkina Faso (Freschet et al., 2008), au Mali (Blanchard et al., 2013), au Niger (Achard and Banoïn, 2003) et au Sénégal (Audouin et al., 2015; Garin et al., 1990). La pratique du parage des animaux la nuit dans les champs cultivés génère des transferts de nutriments et de matière organique des zones de parcours, où les animaux pâturent la journée, vers les zones de cultures, où ils excrètent et concentrent la matière organique la nuit pendant leur parage (Dugué, 1998).

² Le terme Afrique de l'Ouest est employé par extension et par soucis de concision dans cette thèse. Le travail se centre sur la zone sahélo-soudanienne où se trouve la majorité des SASP ouest-africains.

Ainsi, l'élevage extensif³, notamment de par sa mobilité dans le terroir, est un acteur essentiel de l'organisation des cycles des nutriments et du carbone et donc de la gestion de la fertilité des sols (Hiernaux et al., 1997).

Les troupeaux bénéficient d'espaces spécifiques pendant la saison des cultures (en saison des pluies) : parcours et jachères, alors qu'ils ont généralement accès à l'ensemble du terroir villageois après les récoltes (en saison sèche). Les jachères, dans la partie cultivée, sont généralement groupées pour mieux isoler des troupeaux des cultures en saison des pluies. Dans les terroirs villageois, des corridors sont généralement balisés pour permettre le déplacement des troupeaux au milieu des cultures entre les zones de pâturage et les lieux d'abreuvement (Dugué, 1998). Ainsi, les dynamiques d'allocation des terres, d'occupation du sol, et de structuration des SASP traditionnels prennent en compte les pratiques d'élevage et les mouvements des animaux (Lambin et al., 2001; Villamor et al., 2011).

La structure paysagère des SASP est façonnée par les activités agricoles qui s'y déroulent (Brossier et al., 1995; Deffontaines, 1997). Dans les SASP ouest africains, les pratiques de gestion des ressources et d'occupation du sol se traduisent par la distinction de **4 unités paysagères** (Manlay et al., 2004b; Pélissier, 1966; Ramisch, 2005). Une unité paysagère est définie par Zonneveld (1989) comme une zone homogène d'un terroir en termes d'occupation du sol, de pratique de gestion des ressources et de processus biophysiques. Les activités agricoles s'organisent autour des habitations. Sous forme d'auréoles concentriques, on retrouve, du centre vers la périphérie (Figure 1) :

- les habitations ;
- les champs « de case », où les cultures vivrières sont produites et où les ressources productives sont concentrées en priorité ;
- les champs « de brousse », où les cultures de rente sont produites et où se trouvent les jachères ;
- les parcours, dédiés au pâturage des animaux.

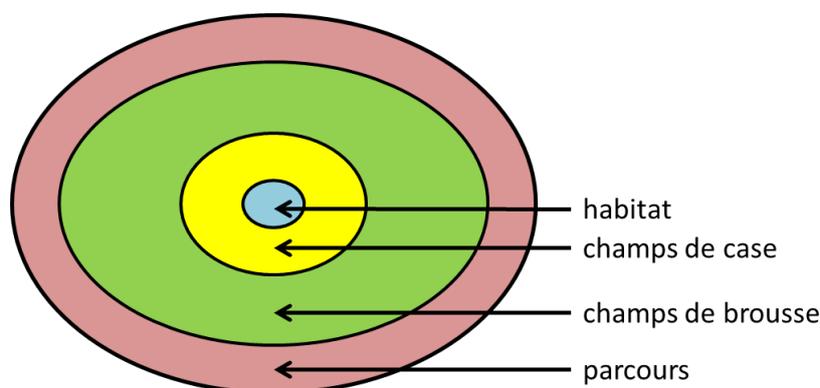


Figure 1. Représentation schématique d'un terroir agro-sylvo-pastoral en Afrique de l'Ouest en 4 unités paysagères

Les agriculteurs concentrent leurs moyens de production (ex. main d'œuvre, matière organique) sur des parcelles particulières, notamment sur les champs à proximité des habitations, c'est-à-dire les champs « de case ». C'est le cas des matières organiques provenant de l'élevage et des habitations. Ceci est considéré comme un moyen d'assurer un niveau de production vivrière suffisant pour le ménage et donc la sécurité alimentaire des ménages (Tittonell et al., 2007c).

³ Comme proposé par Lhoste (1987, p. 63) : « le terme « extensif » se justifie effectivement par le peu d'intrants consacrés par l'éleveur son troupeau et par les charges animales relativement faibles sur le pâturage (en nombre de têtes par hectare). »

1.2 Systèmes agro-sylvo-pastoraux en transition en Afrique de l'Ouest

1.2.1 Les déterminants de l'évolution des SASP

D'après Williams et al. (1999), les facteurs influençant les systèmes agriculture-élevage sont de nature biophysique, démographique et politique (Figure 2). Ces facteurs influencent les conditions matérielles et de production ainsi que les environnements économiques et institutionnels.

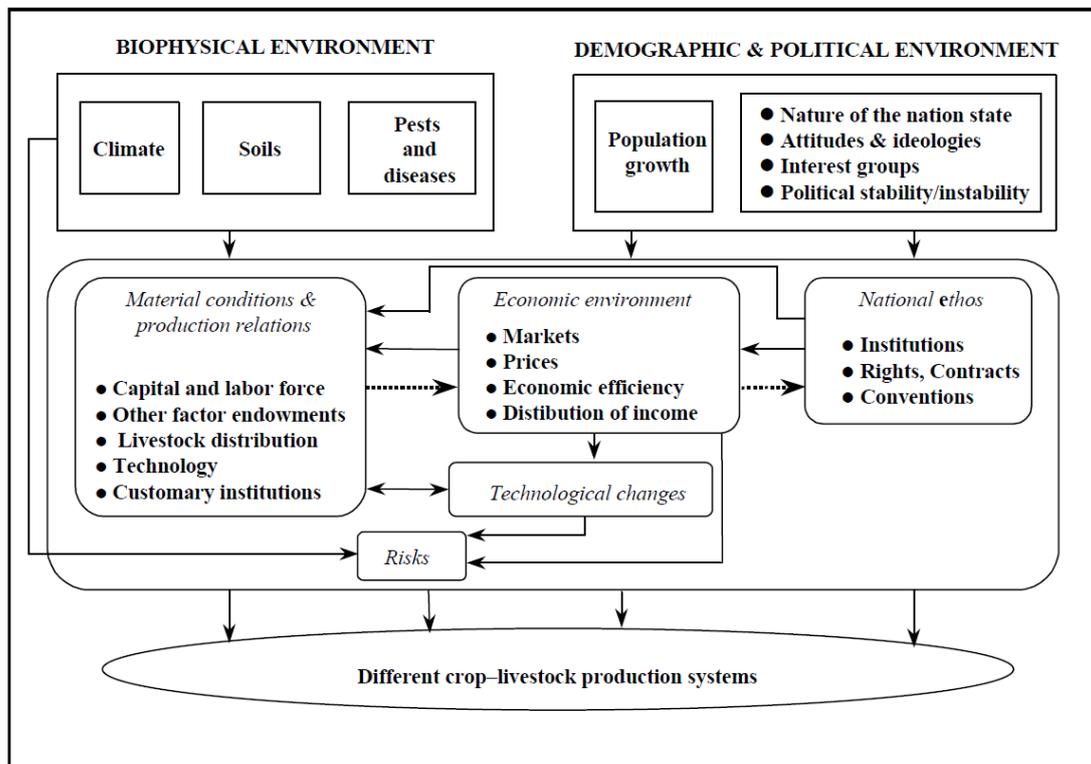


Figure 2. Les déterminants de l'évolution des systèmes mixtes agriculture-élevage (Williams et al., 1999)

En Afrique de l'Ouest, les sols sont pauvres en matière organique et en éléments minéraux de par leur pédogenèse (Pieri, 1989). Cette faible fertilité des sols ainsi que la pression des ravageurs sont relativement stables comparativement à la variabilité et imprévisibilité climatique (Perret, 2008). Des périodes de sécheresse mettent régulièrement ces systèmes à l'épreuve du fait d'une moindre disponibilité en biomasses (ex. sécheresses de la fin des années 1960 et 1980). L'évolution du climat en Afrique de l'Ouest dans les prochaines décennies est incertaine, mais le risque d'accroissement de la variabilité climatique et de récurrence d'événements extrêmes (dont les sécheresses) est important (Guichard et al., 2015).

Par ailleurs, d'ici 2050, la population en Afrique subsaharienne devrait être multipliée par 2,5 tandis que la demande en céréales va tripler (van Ittersum et al., 2016). Depuis le siècle dernier, la croissance démographique est élevée : de +2,6%/an en Afrique de l'Ouest dans la dernière décennie contre +1,2%/an dans le monde. Le taux d'urbanisation est de 4%/an (Ouedraogo, 2007). La croissance démographique, associée à un fort taux d'urbanisation, augmente la demande en produits alimentaires et, plus particulièrement, ceux d'origine animale du fait d'un changement des habitudes alimentaires (Kamuanga et al., 2008). Entre 1991 et 2007, la consommation mondiale en produits carnés a augmenté de +2,5%/an et en produits laitiers de +1,6%/an. Dans les pays en voie de développement l'augmentation est plus marquée, notamment en Afrique subsaharienne, où la consommation croît de 3,4% et 3,5% par an, respectivement pour les produits carnés et laitiers (Alexandratos et al., 2012).

L'augmentation de la population et de la demande associée en produits agricoles requiert de produire plus. De nouveaux marchés se développent pour les produits animaux en direction des villes mais également en produits maraichers, comme observé par Gangneron et Robert (2015) au Sénégal et au Bénin. En revanche, les cultures de rente, à l'origine fortement subventionnées dans les années 1960 et bases du modèle de développement agricole dans ces régions, subissent régulièrement des crises et baisses de prix ; par exemple

dans les années 1980 pour l'arachide au Sénégal (Lericollais, 1999) et 2000 pour le coton au Burkina Faso et au Mali (Falconnier et al., 2015).

1.2.2 Evolution des SASP traditionnels

En réponse à cette croissance rapide des besoins alimentaires, deux solutions pour augmenter la production sont possibles : mettre en culture de nouvelles terres (agriculture d'expansion, EXPAGR) ou intensifier la production des terres actuellement cultivées (agriculture intensifiée à faible, LEIA, ou fort, HEIA, niveau d'intrants) (Schiere and De Wit, 1995). En Afrique subsaharienne, l'expansion des terres cultivées associée à une intensification à bas niveaux d'intrants a été jusqu'à aujourd'hui privilégiée par les agriculteurs.

A partir des années 1960, le développement de la traction animale a permis une dynamique d'expansion des surfaces cultivées et d'intensification des cultures du fait d'une meilleure application des façons culturales (Lericollais, 1999). L'expansion des cultures réduit la durée de jachère et les surfaces de parcours (Achard and Banoïn, 2003; Dugué, 1998). Ruthenberg (1971) propose d'ailleurs une catégorisation du niveau d'intensification des systèmes en fonction du rapport entre surface en jachère et surface cultivée totale.

Dans le numéro spécial 48 de la revue *Food Policy* paru en 2014, les auteurs reprennent les questionnements de Malthus⁴ et Boserup⁵ sur les relations entre pressions démographique et foncière et le développement agricole (Jayne et al., 2014). Ils montrent notamment que l'augmentation de la population est liée d'une manière ou d'une autre à la diminution des surfaces cultivées en agriculture familiale et la mise en culture continue des terres (Jayne et al., 2014). Dugué (1998) estime qu'au-delà de 60 à 80 habitants/km², les systèmes sont contraints d'abandonner les jachères en faveur des cultures continues pour augmenter, au niveau du terroir, la surface cultivée. Cela se traduit par une augmentation de la production mais pas de la productivité à l'hectare. En effet, une diminution de la fertilité moyenne des terres cultivées est observée due à la mise en culture des terres les moins fertiles, auparavant laissées en parcours (Sanchez, 2002; Smaling et al., 1997).

Dans les systèmes en forte croissance démographique, la place des animaux dans les terroirs et particulièrement de l'élevage extensif est donc remise en question. L'espace disponible pour l'élevage mobile se restreint et la biomasse fourragère disponible semble avoir également diminué, comme observé au Burkina Faso (Vall et al., 2006) et au Niger (Achard and Banoïn, 2003). La pression sur les ressources s'accroît et de plus en plus de ménages récoltent les résidus de culture pour les stocker (Andrieu et al., 2015; Tittonell et al., 2015). Ils les utilisent ensuite pour les animaux à l'étable ou bien pour les animaux conduits en extensif quand les ressources fourragères se font plus rares. La disponibilité des résidus de culture pour la vaine pâture pendant la saison sèche est donc négativement affectée. L'ensemble de ces évolutions remettent profondément en cause l'existence des « systèmes traditionnels » basés sur un élevage mobile.

On parle donc de systèmes traditionnels « en crise », notamment au Yatenga, Burkina Faso (Marchal, 1983) ou encore dans le bassin arachidier au Sénégal (Guigou and Lericollais, 1992; Lericollais, 1999; Pieri, 1989), ou plus récemment, dans les régions densément peuplées d'Ethiopie (Agegnehu and Amede, 2017). Les cheptels conduits en extensif peuvent tendre à diminuer sur ces terroirs du fait d'un enchaînement de causes à effets décrits par Lhoste (1987) (Figure 3). Toutefois, Landais et al. (1991) ont montré pour le Sénégal et la Côte d'Ivoire, que bien que le nombre de bovins possédés par habitant diminue, la densité de population animale est tout de même croissante du fait de la forte croissance démographique humaine.

⁴ Malthus (1798), d'après Jouve (2006) : « l'augmentation de la population rurale entraîne un accroissement de la pression sur les ressources et en particulier sur la terre »

⁵ Boserup (1965), d'après Jouve (2006) : « [dans les pays non industrialisés] l'augmentation de la population rurale est un facteur favorable à l'intensification agricole et [...] dans ces conditions il est illusoire de s'attendre à une intensification de la production agricole si la densité de population est faible. »

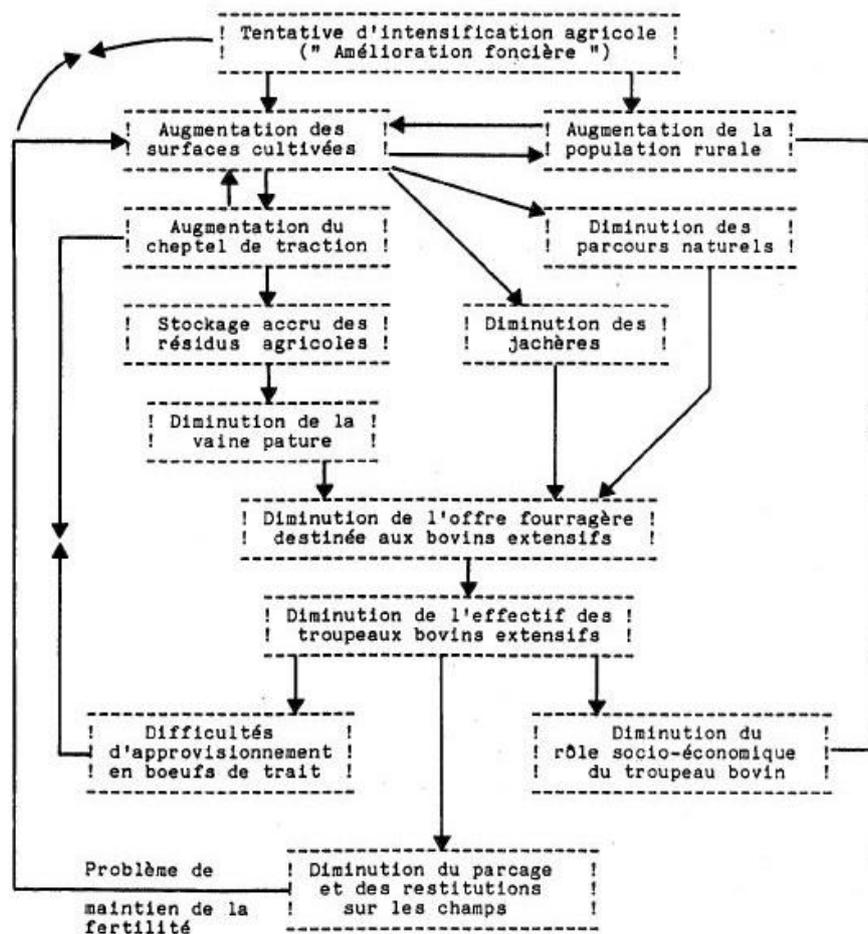


Figure 3. Schéma explicatif de la diminution de l'effectif de bovins extensifs (Lhoste, 1987)

Dans les terroirs plus densément peuplés, et dont le paysage est largement cultivé, différentes stratégies sont mises en place par les agro-éleveurs pour conserver des animaux dans les terroirs. Certains terroirs s'éloignent de la gestion collective des parcours et jachères pour une gestion plus individuelle. Ils répondent à des marchés en produits animaux attractifs et choisissent des systèmes d'élevage plus intensifs (en quantité de ressource mobilisée par hectare) : de type embouche ou production laitière de contre saison. Ces systèmes comprennent une phase plus ou moins longue de stabulation (Dugué, 1998; Sow et al., 2004). Ainsi, les ménages s'affranchissent des contraintes d'espace requis par les animaux extensifs mais ont recours à davantage d'intrants issus de l'extérieur des terroirs (achat d'aliments concentrés). La pratique de la transhumance déjà largement répandue est toujours pratiquée : les troupeaux avec les plus grands effectifs sortent du terroir toute l'année ou une partie de l'année, généralement en période de soudure (Magrin et al., 2011). Lorsqu'ils reviennent sur les terroirs, les troupeaux transhumants renouvellent les effectifs sédentaires et participent aux transferts de nutriments pendant la saison de vaine pâture, correspondant à une plus forte disponibilité des résidus de cultures.

1.2.3 Flux de nutriments pour l'intensification écologique des SASP

Les SASP sont des écosystèmes gérés par l'homme dans un objectif de production, distribution et consommation de nourriture, combustibles et fibres (Burel and Baudry, 1999; Cabell and Oelofse, 2012), on parle donc d'agro-écosystèmes. En tant qu'écosystèmes, les SASP disposent d'une biodiversité animale et végétale (dans la limite des espèces respectivement élevées et cultivées), d'une cohérence entre processus écologiques reliés entre eux par des flux de nutriments et d'énergie, d'une stabilité et d'une structuration spatiale des processus écologiques autour d'un bassin d'attraction (Burel and Baudry, 1999). Ils sont parcourus par des flux de matières et d'énergie.

Dans une dynamique de développement durable, de nombreux courants se sont intéressés aux systèmes d'agriculture adaptés, basés sur l'ajustement des pratiques culturales aux conditions et disponibilités locales (Schiere et al., 2002). Ainsi, le système développé doit être en mesure de maintenir et gérer durablement les ressources rares en son sein (par exemple nutriments, eau) en les recyclant au mieux. Dans un contexte de croissance démographique, le concept d'**intensification écologique** (Cassman, 1999; Doré et al., 2011; Tiftonell and Giller, 2013) apparaît particulièrement pertinent en Afrique de l'Ouest (Dugué et al., 2011). Il s'agit d'« un moyen d'augmenter la production agricole (nourriture, fibre, biocarburants et services environnementaux) tout en minimisant l'utilisation et le besoin en intrants externes (engrais minéraux, combustibles et plastiques) et en capitalisant sur les processus écologiques qui supportent et régulent la productivité primaire des agro-écosystèmes » (Tiftonell and Giller, 2013). Ce concept est proche du concept de « gestion intégrée » des systèmes notamment décrit par Mermet et al. (2005) qui vise au « maintien ou rétablissement de qualités propres aux systèmes écologiques ».

Les productions des plantes et des cultures sont fortement tributaires de la disponibilité en minéraux essentiels à la croissance des plantes (azote, phosphore, potassium), encore appelés nutriments. Les agricultures familiales d'Afrique de l'Ouest, sont particulièrement limitées du fait de la faible fertilité des sols dans cette région (Pieri, 1989) et de l'accès limité aux engrais minéraux, notamment à cause de leur coût et du manque d'infrastructures pour leur acheminement en milieu rural (Tiftonell and Giller, 2013). La gestion des flux de nutriments peut être un moyen pour intensifier les SASP. Ainsi, les processus générant des flux de biomasses, de carbone et de nutriments dans les SASP sont très étudiés en contexte tropical : flux de biomasses au Burkina Faso (Diarisso et al., 2015), flux de biomasses (Naudin et al., 2015) et d'azote (Alvarez et al., 2014) à Madagascar, flux de carbone au Zimbabwe (Rufino et al., 2011), ou plus généralement sur les systèmes d'Afrique subsaharienne (Rufino et al., 2006). Des analyses combinées du carbone et de l'azote ont été menées sur les écosystèmes pâturés (Soussana and Lemaire, 2014) et pour le carbone, l'azote et le phosphore au Sénégal (Manlay et al., 2004a). Dans ces études, l'objectif général est d'optimiser les cycles de biomasses et d'éléments nutritifs des sols pour coupler les différents cycles, en limiter les pertes et augmenter la disponibilité pour les plantes et les animaux.

Des indicateurs de fonctionnement et de performance des SASP peuvent être décrits à partir des flux de biomasses et de nutriments. D'un point de vue fonctionnel, la méthode d'analyse de réseau écologique (*Ecological Network Analysis*, ENA) met en évidence les interactions entre les différents compartiments définis au sein du système pour identifier ses propriétés (Fath et al., 2007). Cette méthode a notamment été utilisée par Rufino et al. (2009a), Alvarez et al. (2014), Stark et al. (2016) et par Bénagabou et al. (2017) pour étudier le fonctionnement et les performances de systèmes agricoles. Ainsi, il est possible de déterminer le degré de valorisation des ressources locales (Vall et al., 2011) et le niveau de dépendance du système vis-à-vis de son environnement (Rufino et al., 2009b). Le recyclage des flux de nutriments entre les activités d'agriculture et d'élevage accroissent l'autonomie des agro-écosystèmes mixtes et limitent les pertes dans l'environnement. D'un point de vue performances, les bilans et efficacités de ces systèmes peuvent être calculés selon la méthode des bilans (*system gate balance*) pour évaluer leur capacité à produire tout en conservant les nutriments. Le bilan et l'efficacité de l'utilisation des nutriments sont deux indicateurs très utilisés pour évaluer la durabilité, comme revus par Schlecht et Hiernaux (2004), et plus récemment utilisés par Andrieu et al. (2015) au Burkina Faso.

1.3 Problématique et hypothèses

En résumé, en zone sahélo-soudanienne, les SASP se basent traditionnellement sur un recyclage important des biomasses entre les activités d'élevage et de culture. La gestion des déjections animales et de la fumure organique détermine les transferts spatiaux de nutriments et l'essentiel des dynamiques de fertilité des sols cultivés (Dugué, 1998; Manlay et al., 2004b; Powell et al., 2004). En réponse à une croissance démographique forte, les paysages agricoles évoluent en faveur des surfaces cultivées et au détriment des surfaces en jachères et en parcours. En conséquent, les agriculteurs réorganisent leurs ressources productives, modifient leurs stratégies (d'Aquino and Bah, 2013), et doivent repenser leurs pratiques agricoles. Le SASP traditionnel, géré en partie collectivement au niveau du terroir villageois, à travers des espaces communs (parcours, jachères

regroupées et/ou corridors de circulation), est progressivement abandonné au profit de systèmes gérés de façon plus individuelle au niveau du ménage. L'ensemble de ces dynamiques remettent en cause la conduite extensive et mobile des ruminants ainsi que les pratiques traditionnelles de renouvellement de la fertilité des sols liés aux déplacements des animaux dans les terroirs villageois (Lericollais and Faye, 1994; Vayssières et al., 2015). Se pose alors la question de la réorganisation des cycles des nutriments concomitante à cette transition agraire et à l'évolution des SASP. Et plus particulièrement :

Comment les modifications concomitantes des paysages agricoles et des systèmes d'élevage pratiqués par les ménages impactent-elles la dynamique des cycles des nutriments et donc, le fonctionnement et la durabilité des SASP ? Quel est le lien entre les dynamiques individuelles au niveau du ménage et les dynamiques au niveau du terroir villageois ?

Pour répondre à ces questions, la thèse répond à deux objectifs :

- un objectif méthodologique O1 :
- Représenter le fonctionnement des SASP en tenant compte de l'hétérogénéité des pratiques des ménages et de la structure des paysages des terroirs villageois, avec l'hypothèse qu'un unique modèle peut représenter la diversité des SASP existants, présents et passés.
- un objectif thématique O2 :
- Analyser l'impact de **l'évolution des paysages et des systèmes d'élevage** au cours d'une période de plusieurs décennies sur le fonctionnement et la durabilité des SASP, avec l'hypothèse que l'évolution rapide des activités agricoles pratiquées par les ménages a conduit à une réorganisation du cycle des nutriments au niveau individuel du ménage mais également au niveau collectif, du terroir villageois.

1.4 Choix méthodologiques

1.4.1 Point sur l'azote en tant que nutriment limitant

L'azote (N) est un des principaux nutriments limitant le développement des plantes et des animaux (Schlecht et al., 2006), en particulier en Afrique de l'Ouest où les sols sont pauvres en N par nature (Pieri, 1989). De plus, l'N est un élément important dans l'excrétion des troupeaux, via leurs urines notamment (Defoer et al., 1998; FAO, 2001c). Enfin des pertes d'N depuis l'agroécosystème vers l'environnement interviennent tout au long du cycle de l'N sous forme gazeuse ou par lixiviation. Ces pertes peuvent être augmentées en particulier en contexte tropical (Vayssières and Rufino, 2012). Il est donc pertinent de s'intéresser plus particulièrement, dans le cadre de cette thèse, au cycle de l'N pour évaluer le fonctionnement des SASP.

1.4.2 Couplage de deux modèles conceptuels

Le recyclage de la biomasse et le cycle de l'N correspondant sont traditionnellement représentés par des modèles stock-flux. Dans ces modèles, les flux circulent entre les différents compartiments du système. Dans le cas des SASP, différents compartiments peuvent être différenciés selon deux modalités.

D'une part, comme Rufino et al. (2006) et proposé par Thornton et Herrero (2001) pour l'étude des systèmes mixtes agriculture-élevage, on peut s'intéresser aux flux circulant au sein des entités gérées par l'agriculteur dans le système agricole du ménage (Figure 4).

Les 5 entités distinguées sont :

- « troupeau », regroupant tous les animaux gérés par le ménage agricole,
- « sol-plante », correspondant aux parcelles cultivées,
- « tas de matière organique », correspondant aux stocks de fertilisants à destination des cultures,
- « grenier », correspondant aux stocks de produits à destination de la consommation humaine (aliments et combustibles) et animale (fourrages),

- « humain », entité de consommation regroupant les habitants du système étudié (un ménage ou un terroir villageois selon le niveau d'analyse).

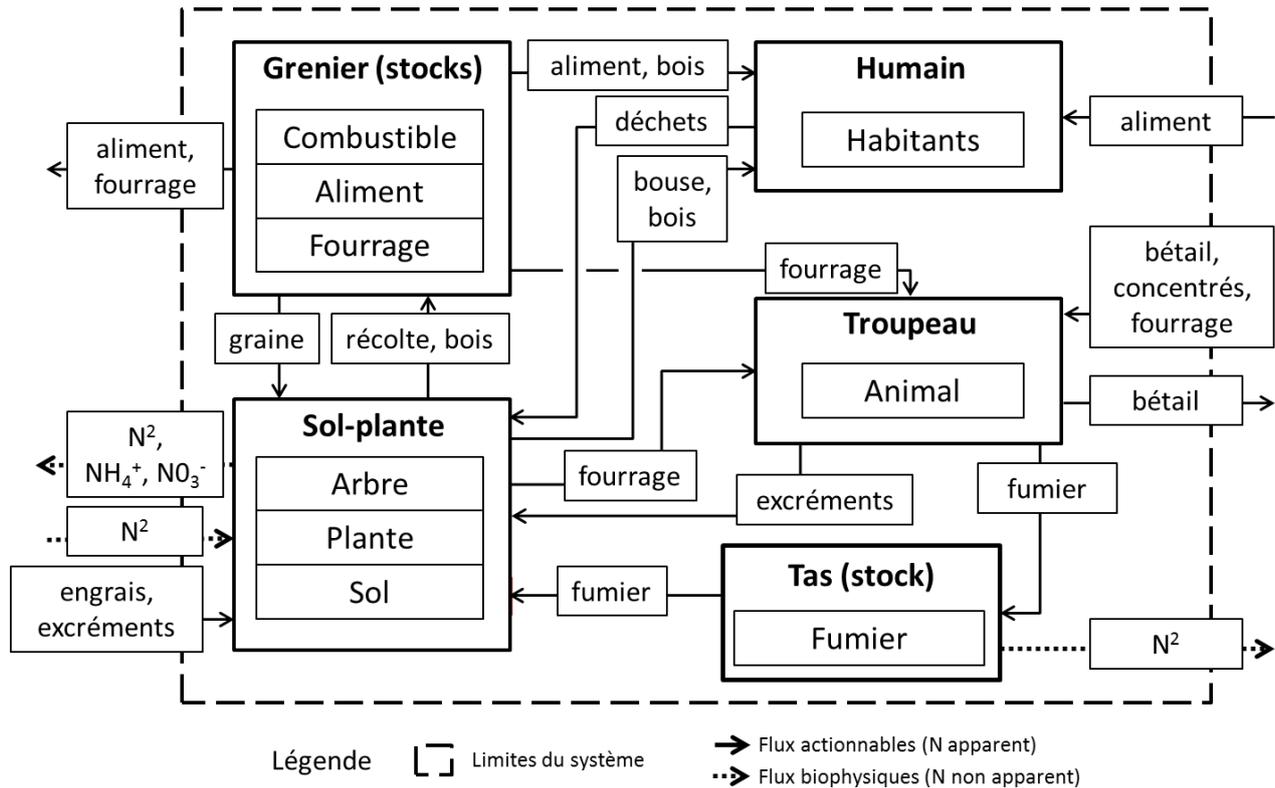


Figure 4. Modèle conceptuel de flux d'azote dans les SASP entre activités agricoles

D'autre part, on peut aussi représenter les SASP par les flux spatialisés dans le paysage circulant entre les différentes unités paysagères définies en §1.1.3 : habitat, champs de case, champs de brousse et parcours (Figure 5).

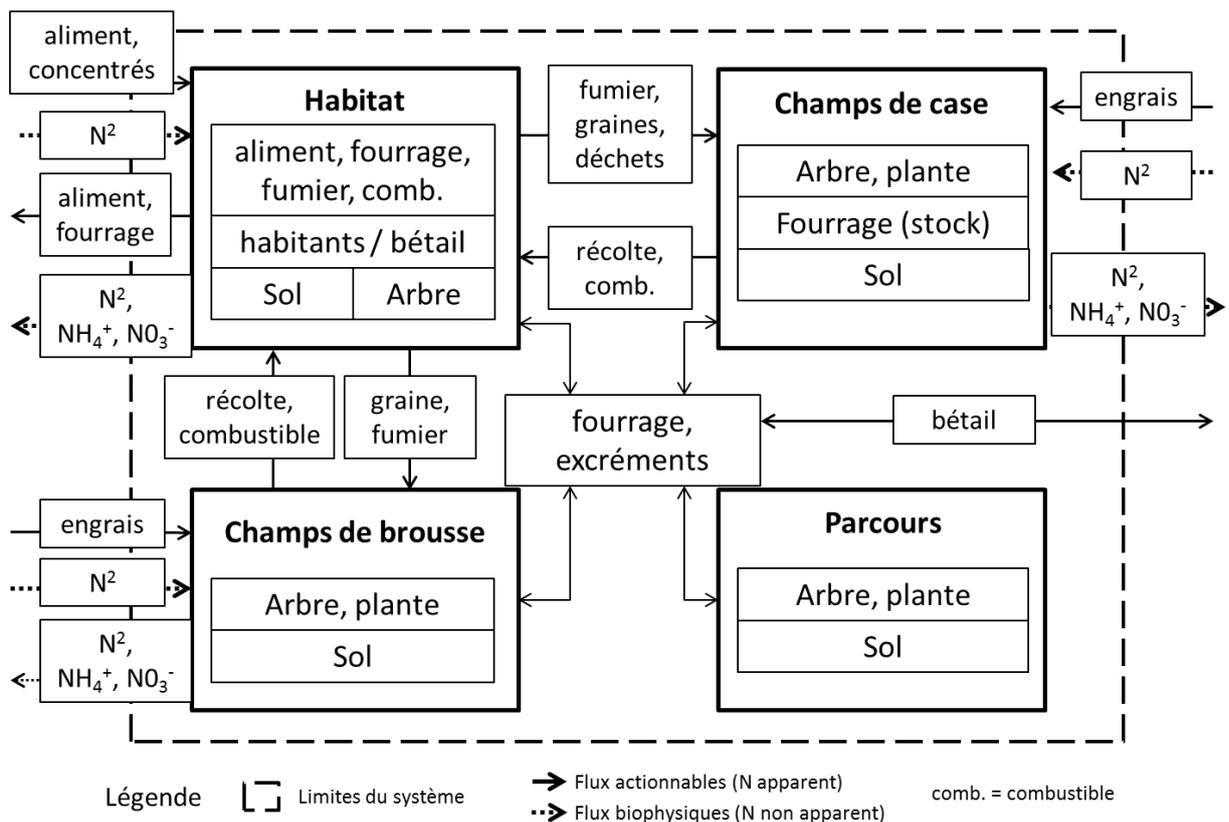


Figure 5. Modèle conceptuel de flux d'azote dans les SASP entre unités paysagères

1.4.3 Recours à la modélisation multi-agents

L'analyse des flux de nutriments circulant dans un SASP peut être effectuée à partir de données d'enquêtes couplées à des mesures de terrain. Le recueil de telles données se fait aux niveaux inférieurs (parcelle, troupeau et ménage) et est particulièrement contraignant et requiert du temps, pour l'enquêteur et l'enquêté. Réitérer ce travail de collecte de données sur le terrain pour plusieurs terroirs villageois est particulièrement coûteux en temps et en moyens. Bien que cela ait déjà été effectué par [Audouin \(2014\)](#), [Dugy \(2015\)](#), [Odru \(2013\)](#) et [Saunier-Zoltobroda \(2015\)](#) pour comparer divers terroirs villageois dans le bassin arachidier, d'autres méthodes sont possibles.

La **simulation informatique**, d'après [Hill \(1993\)](#) cité par [Coquillard et Hill \(1997\)](#), « consiste à faire évoluer au cours du temps une abstraction d'un système – appelée modèle –, afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et à en appréhender ses caractéristiques dynamiques, dans l'objectif d'évaluer différentes décisions ». Plus précisément, Coquillard et Hill décrivent ainsi le **modèle** : « pour un observateur A, β est un **modèle** de B si A peut, à partir de β , apprendre quelque chose d'utile sur le fonctionnement de B (dérivé de Minsky, 1965 dans [Coquillard et Hill \(1997\)](#)) ». [Refsgaard et Henriksen \(2004\)](#) résument les différents éléments de vocabulaire relatifs à la modélisation ([Figure 6](#)). Une fois le modèle construit, paramétré et validé à partir de données collectées sur des échantillons types, l'expérimentateur peut s'affranchir d'une nouvelle collecte afin de tester différents scénarios (ex. des scénarios à plus large échelle, avec levées de contraintes, etc.). Dans notre cas la simulation informatique apparaît particulièrement utile pour **reconstruire des situations passées** qu'il n'est plus possible d'observer aujourd'hui.

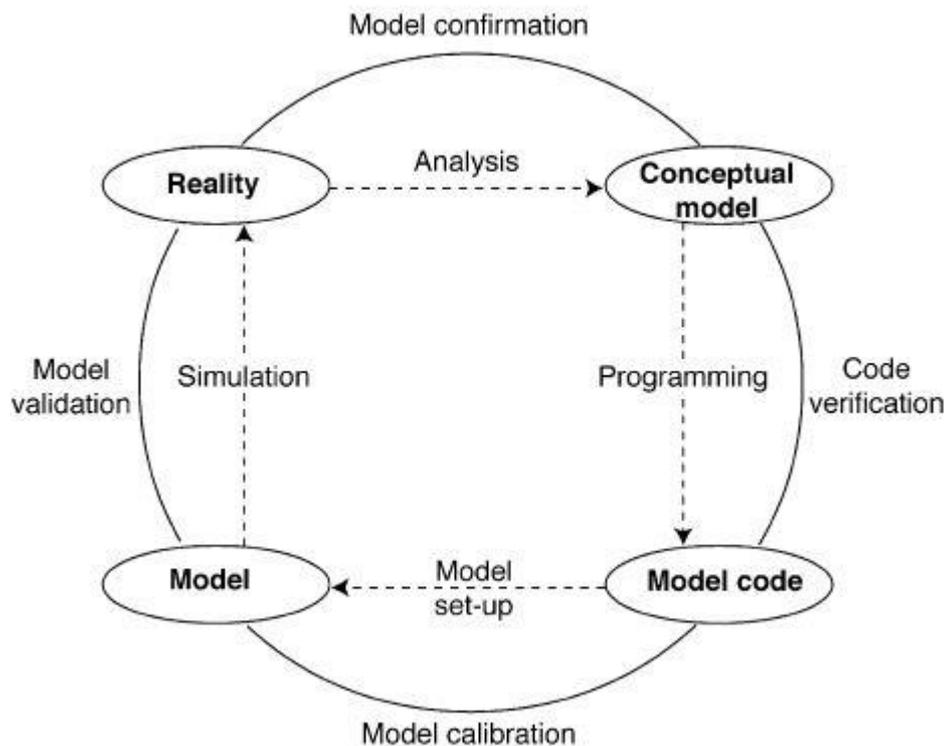


Figure 6. Terminologie en modélisation ([Refsgaard and Henriksen, 2004](#))

Chaque modèle est construit et utilisé pour répondre à une question. Ici, l'objectif est de mieux comprendre le fonctionnement et la dynamique des systèmes complexes que sont les SASP. Il n'y a pas d'objectif de prédiction mais plutôt d'exploration de ces systèmes. Dans les SASP, il existe de nombreuses dynamiques d'interactions entre les processus biophysiques et sociaux que l'on doit prendre en compte. [Kelly et al. \(2013\)](#) ont distingué différentes méthodes de modélisation en fonction de différents objectifs de recherche ([Figure 7](#)). Dans les objectifs de cette thèse, la modélisation multi-agents semble la plus adaptée. Elle est très utilisée pour étudier la gestion d'écosystèmes naturels ou anthropisés. La revue de littérature de [Bousquet et Le Page \(2004\)](#) et le chapitre dédié de [Le Page et al. \(2013\)](#) donnent une information plus exhaustive sur ce sujet. La modélisation multi-agents est également adaptée à l'étude des dynamiques liées aux changements

d'occupation du sol, voir par exemple la revue de littérature de [Matthews \(2007\)](#) et l'utilisation par [David et al. \(2007\)](#) pour de l'aménagement du territoire. De plus, la **simulation** permet d'explorer différentes évolutions possibles des systèmes et répondre à des questions de type « qu'est-ce qui se passe si ? » (« What if? » décrit par [Börjeson et al. \(2006\)](#)), contrairement à l'optimisation qui cherche à atteindre une situation donnée et répondre à des question du type « How to? » ([Pacaud, 2007](#)).

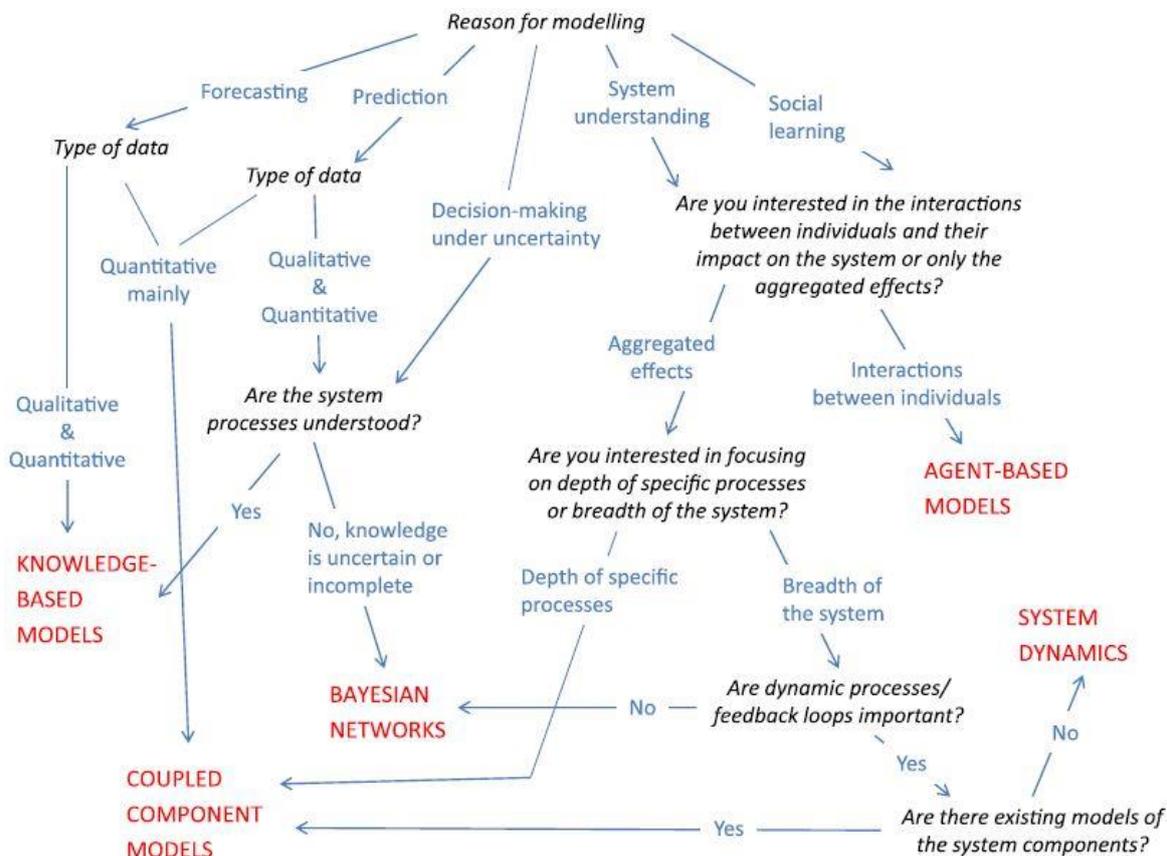


Figure 7. Arbres de décision pour le choix de la méthode de modélisation appropriée au problème (Kelly et al., 2013)

Un **agent** est, d'après la définition de [Ferber \(1995\)](#) :

« Une entité physique ou virtuelle :

- a. qui est capable d'agir dans un environnement,
- b. qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
- c. qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- d. qui possède des ressources propres,
- e. qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
- f. qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
- g. qui possède des compétences et offre des services,
- h. qui peut éventuellement se reproduire,
- i. dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit. »

Ainsi, pour *Ferber (1995)*, un *système multi-agents (SMA)* est défini comme :

« Un système composé des éléments suivants :

1. Un environnement E , c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
2. Un ensemble d'objets O . Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E . Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents
3. Un ensemble A d'agents, qui sont les objets particuliers (A inclut O)
4. Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
5. Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O .
6. Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers. »

Ferber (1995) a représenté graphiquement le concept de SMA en montrant la représentation de l'agent, de son environnement et des interactions qui y ont lieu (*Figure 8*). La définition minimale pour les **modèles multi-agents**, reprise par *Picault (2013)* est : « un système composé d'entités autonomes (appelées agents) qui peuvent interagir les unes avec les autres au sein d'un environnement commun ».

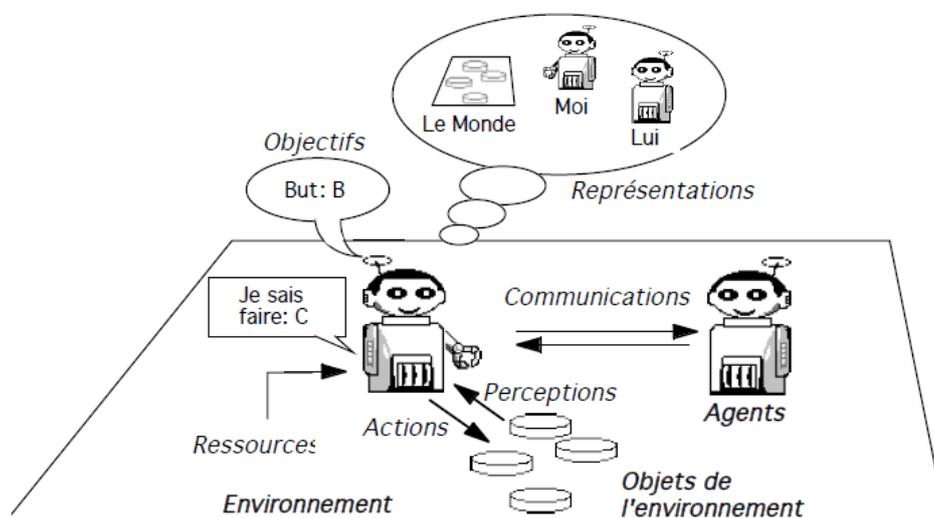


Figure 8. Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement (*Ferber, 1995*)

Les modèles multi-agents représentant des agrosystèmes permettent d'intégrer un système biophysique et un système décisionnel. Le système biophysique permet de décrire le fonctionnement des processus naturels. Le système décisionnel permet de simuler les actions ou pratiques issues d'une volonté (ex. pour un ménage donné : choix d'occupation du sol ; pour un animal : choix de la parcelle de pâture). L'utilisation d'un modèle multi-agents permet aux agents d'avoir des dynamiques biophysiques et décisionnelles propres et d'interagir entre eux et avec leur environnement. L'approche multi-agents apparaît particulièrement pertinente pour étudier le fonctionnement et la dynamique des SASP. Ces derniers sont des systèmes complexes :

- (i) où processus biophysiques (ex. ingestion et excrétion animale) et décisionnels (ex. choix de lieux de parage nocturne pour les troupeaux) interagissent ;
- (ii) où des phénomènes spatialisés sont déterminants, par exemple transferts spatiaux de nutriments liés aux déplacements et la localisation des troupeaux dans le temps et l'espace ;
- (iii) et où des interactions fortes peuvent exister entre agents, par exemple transfert de nutriments depuis les ménages à petits troupeaux et ayant un important disponible fourrager vers les ménages à grands troupeaux via le système de vaine pâture.

Comme décrit par [Cerf et Sebillotte \(1988\)](#) et repris par [Aubry et al. \(1998\)](#), le système décisionnel peut être décrit par le **modèle d'action**, représenté par :

- (i) un ou plusieurs objectifs généraux,
- (ii) une planification des actions (ou plan d'action),
- (iii) un jeu de règles de décision et d'indicateurs pour la décision.

Le modèle d'action sert de base aux décisions d'action, prises « en temps réel » au cours du processus de production et qui aboutissent à la réalisation des **opérations techniques** (i.e. actions quotidiennes ; ex. alimentation animale, épandage du fumier, semis) ([Fountas et al., 2006](#)).

D'autres auteurs proposent de représenter l'action en tant que processus « situé ». Ce processus n'a pas besoin d'objectifs, décision ou cognition mais d'un comportement réactif dans les situations auxquelles il participe ([Guerrin, 2007](#); [Suchman, 1987](#)).

Dans cette thèse, on utilise la vision de modèle d'action décrite ci-dessus, qui, comparativement à l'action située, permet une analogie plus aisée entre les pratiques décrites en enquête par les ménages et les pratiques modélisées.

1.4.4 Simulation de SASP variés dans une même zone d'étude

Pour répondre à la problématique, des SASP contrastés doivent être analysés. En Afrique de l'Ouest, les SASP présentent un ensemble de caractéristiques communes telles que leur organisation en terroir villageois (cf. §1.1.3), cependant ils diffèrent notamment dans leurs structures paysagères et pratiques d'élevage. Les pratiques de gestion de flux de biomasses actuelles sont généralement assez bien décrites qualitativement ou quantitativement pour les différents SASP, ex. au Burkina Faso ([Diarisso et al., 2015](#)). Toutefois, l'évolution de ces pratiques sur le temps est beaucoup plus rare. Le choix du terrain de cette thèse, le bassin arachidier du Sénégal, a été motivé par l'existence de données historiques riches, avec en particulier une description relativement complète de l'évolution temporelle des pratiques et des systèmes étudiés, en référence à des périodes clefs de la transition agraire étudiée ex. [Lericollais \(1999\)](#) et [Pélissier \(1966\)](#).

Dans le bassin arachidier du Sénégal, en 1962, un observatoire « Population, Santé et Environnement » a été mis en place par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à Niakhar ([Delaunay, 2017](#); [Delaunay et al., 2013](#)). Cet observatoire se situe à 135 km à l'Est de Dakar et couvre 203 km² ([Figure 9](#)). Les chercheurs y ont suivi 65 puis 30 villages sur la période 1962-2017. L'observatoire a servi de base pour la conduite de différentes études pluridisciplinaires, autant sur la santé des populations, la démographie et les migrations que sur les pratiques agricoles et le climat. Il s'agit d'une zone particulièrement dynamique en termes de croissance démographique et de diversification des activités agricoles. La zone a aujourd'hui atteint un niveau élevé de densité de population (150 à 300 habitants/km² selon les terroirs). Elle est aujourd'hui caractérisée par un paysage largement dominé par les cultures, les parcours représentent moins de 10% du paysage ([Ndiaye et al., 2016](#)). Différents SASP sont présents :

- (i) des SASP « traditionnels », construits autour de systèmes d'élevage mobiles et de jachères gérées collectivement (correspondant au SASP traditionnel décrit en §1.1.3) ;
- (ii) des SASP pratiquant la transhumance saisonnière des troupeaux, ce derniers ont davantage de têtes de bétail que les troupeaux sédentaires ;
- (iii) des SASP plus intensifs, pratiquant l'élevage d'embouche⁶ avec une gestion individuelle des résidus de cultures et des fumiers.

Ce terrain était particulièrement pertinent pour comprendre le rôle de l'évolution du paysage et des systèmes d'élevage sur la réorganisation du cycle de l'N.

⁶ L'élevage d'embouche vise à engraisser les animaux pour approvisionner les marchés en viande animale. Les animaux embouchés sont généralement des bovins et moutons. Ils sont parqués à l'étable, au sein des concessions qu'ils ne quittent que pour rejoindre le marché.

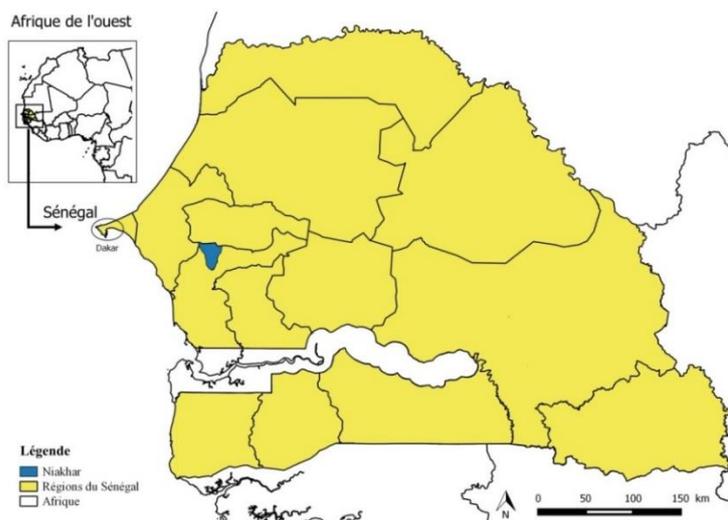


Figure 9. Localisation de l'observatoire de Niakhar au Sénégal

La croissance démographique à Niakhar, similaire à la croissance nationale, est de presque +3%/an depuis le début des années 2000 (Delaunay et al., 2013). Davantage de données sur la démographie (ex. caractéristiques, indicateurs de pauvreté, migrations, fécondité, mortalité, scolarisation) sont disponibles dans le rapport dirigé par Delaunay (2017). Le climat est sahélo-soudanien avec une pluviosité très variable de 590 ± 170 mm (Figure 10 ; ISRA-CERAAS, communication personnelle).

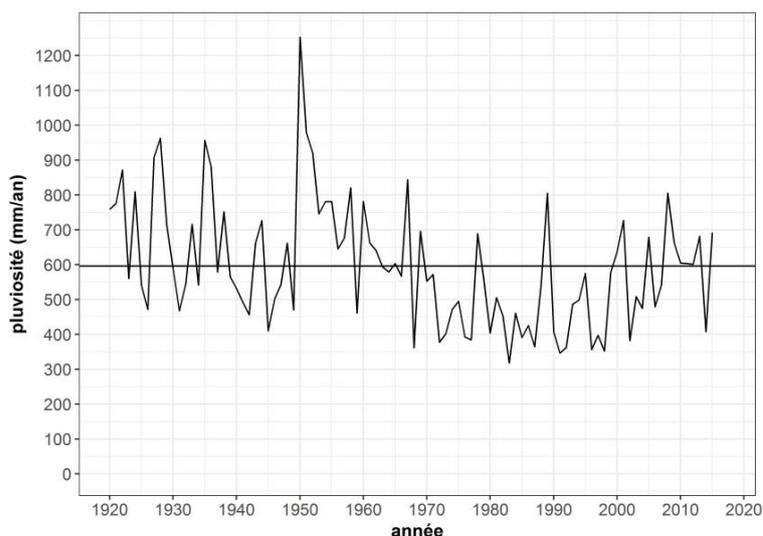


Figure 10. Evolution de la pluviosité de 1920 à 2016 à Bambey
Le site de Bambey est localisé à environ 15 km au Nord de l'observatoire de Niakhar

Pélissier (1966) et Lericollais (1999) décrivent, dans le bassin arachidier et dans la zone de Niakhar, les mêmes contraintes et évolutions que celles décrites précédemment pour l'Afrique de l'Ouest. Ils observent une diminution des surfaces dédiées aux animaux, une réorganisation et individualisation des pratiques (récolte accrue des résidus, augmentation des pratiques d'embouche et de maraîchage). On s'intéresse ici à la **transition agraire** de ces systèmes, entendue au sens de Mazoyer et Roudart (1997) comme une succession de systèmes distincts décrits afin de situer l'évolution des systèmes agraires.

La période précoloniale des 18^e et 19^e siècles, est une période à faible densité de population pendant laquelle les villages s'établissent. Les cultures sont implantées sur les sols sableux (appelés *dior* en langage Sereer), plus faciles à cultiver que les sols argileux (appelés *dek* en Sereer). Des rotations biennales sont pratiquées entre le mil à cycle long et les jachères destinées au parcage des animaux en hivernage. Une auréole arborée entoure les villages (issus de défriches). Elle constitue également des zones de parcours pour les animaux.

Peu de temps après la mise en place du protectorat français, en 1891, l'arachide se développe comme culture de rente. Cette nouvelle production s'intercale alors dans le système de rotations culturales qui devient triennal : mil à cycle long, arachide, jachère. Le défrichement continu et les surfaces cultivées s'étendent sur les sols argileux dont la culture est rendue plus aisée par le développement de la traction animale. Les surfaces de parcours disponibles pour les animaux diminuent. Au début du 20^e siècle, les densités d'habitants sont estimées entre 50 et 80 habitants au kilomètre carré. Les surfaces disponibles varient entre 1 et 1,5 hectare par habitant.

Dans les années 1950-1960, le système entre en déclin, le Sénégal devient indépendant. Le marché de l'arachide n'est plus protégé, les prix chutent, les rendements stagnent et le marché s'effondre. Les sécheresses de la fin des années 1970 jusqu'aux années 1980 participent à la détérioration du système. L'Etat tente de mettre en place une politique de développement des céréales qui montre peu de résultats (Lericollais, 1999). De plus, la mise en disponibilité de nouvelles terres cultivables n'est plus assez rapide par rapport à la croissance démographique. Les surfaces disponibles deviennent inférieures à un hectare par habitant. Les parcs arborés deviennent quasi absents du paysage et les surfaces et périodes de jachères sont fortement diminuées. Les espaces pastoraux ne suffisent plus à couvrir les besoins des animaux. Pélissier (1966) évoque la saturation du territoire d'un point de vue humain, Lericollais (1999, 1970) utilise le terme de détérioration du terroir et conclut son ouvrage sur l'agriculture en Pays Sereer sur un constat de crise.

Dans les villages de l'observatoire, le bétail est la principale source de fertilisation et a permis d'épandre du fumier sur 25% des terres cultivées dans les années 2010 (Audouin et al., 2015). L'activité d'embouche des ruminants s'est développée dans la zone depuis les années 1990, avec des niveaux d'importance différents selon les villages (Garin et al., 1990; Sow et al., 2004).

Trois villages ont été choisis pour ce travail de thèse, du fait de leurs fonctionnements et pratiques agricoles contrastés (cf. les trois types de SASP en début de §1.4.4) :

- Diohine, un village de type « traditionnel » avec présence d'une jachère collective et une forte propension à l'élevage extensif et à l'agriculture de subsistance ;
- Sob, un village pratiquant la transhumance saisonnière et tourné vers les cultures de rente, en particulier, l'arachide ;
- Barry Sine, un village plus intensif, où les activités de rente sont très développées, notamment l'embouche de ruminants.

Les connaissances disponibles sur les SASP présents dans les 3 terroirs ont notamment été utilisées pour la construction du modèle TERROIR, développé dans le cadre de cette thèse.

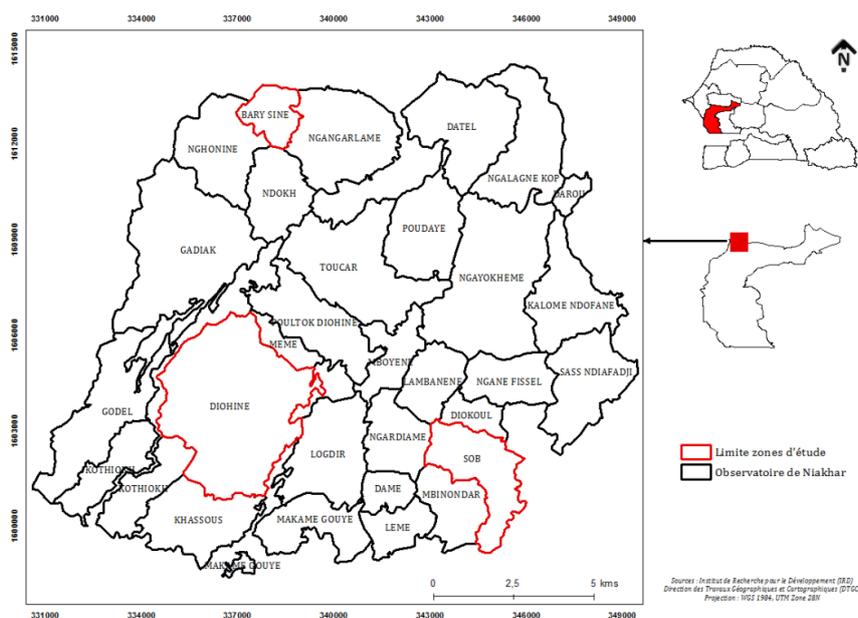


Figure 11. Localisation des trois villages étudiés dans l'observatoire de Niakhar

1.5 Démarche générale et structure du manuscrit

La thèse est découpée en deux activités, correspondant aux deux objectifs généraux écrits en §1.3 (Table 1). Le calendrier précis du déroulement des activités de cette thèse est repris en Annexe 1.

La première activité a été la construction d'un modèle multi-agents pour représenter le fonctionnement d'un SASP. Au préalable, les systèmes décisionnels (via le modèle d'action, correspondant aux décisions tactiques et opérationnelles des ménages) et biophysique ont été conceptualisés. Un processus itératif a permis de construire le modèle d'action, notamment via des allers-retours entre les phases de collecte d'information sur le terrain et de conceptualisation. Les données spécifiques à la gestion de la matière organique, issues des stages réalisés au préalable par Odru (2013), Audouin (2014), Dugy (2015) et Saunier-Zoltobroda (2015) ont été utilisées, puis complétées par un suivi mensuel de 5 ménages types, répartis dans les 3 villages étudiés, sur la période 2015-2016. Le modèle biophysique, végétal et animal, a été implémenté à partir de la littérature. L'intégration du modèle d'action dans le modèle multi-agents a également été faite de manière itérative au long des phases de suivi de terrain. Le modèle multi-agents complet a été évalué à partir des données de flux calculées à partir des enquêtes menées par les étudiants.

La seconde activité de la thèse a consisté à la construction des scénarios de transition agraires dans le bassin arachidier du Sénégal à partir de la littérature (cf. §1.4.4). Ces scénarios ont été utilisés en données d'entrée dans le modèle pour analyser l'évolution du cycle de l'N au cours de la transition agraire étudiée.

Table 1. Principales activités menées pour réaliser la thèse

Objectif et activité	Méthode
Objectif : Représenter le fonctionnement des SASP en tenant compte de l'hétérogénéité des pratiques des ménages et de la structure des paysages des terroirs villageois	
<ul style="list-style-type: none"> • Décrire le système décisionnel dans un modèle d'action des ménages 	<ul style="list-style-type: none"> - Revue de littérature (notamment stages menés dans la zone d'étude) - Suivi de terrain mensuel auprès de 5 ménages répartis dans les 3 villages d'étude (2015-16) - Modélisation conceptuelle
<ul style="list-style-type: none"> • Décrire les systèmes biophysiques (végétaux/animaux) 	<ul style="list-style-type: none"> - Revue de littérature (notamment mesures prises sur la zone d'étude) - Modélisation conceptuelle
<ul style="list-style-type: none"> • Coupler le système décisionnel et le système biophysique dans un modèle multi-agents 	<ul style="list-style-type: none"> - Implémentation informatique sur la plateforme GAMA (http://gama-platform.org/), spécialisée dans la spatialisation des SMA
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluer le modèle multi-agents développé sur la plateforme de simulation GAMA 	<ul style="list-style-type: none"> - Simulations informatiques croisées avec données d'enquête et revue de littérature
Objectif : Analyser l'impact de l'évolution des paysages et des systèmes d'élevage au cours d'une période de plusieurs décennies sur le fonctionnement et la durabilité des SASP	
<ul style="list-style-type: none"> • Construire les scénarios de transition agraire des SASP du bassin arachidier 	<ul style="list-style-type: none"> - Revue de littérature
<ul style="list-style-type: none"> • Analyser l'évolution des cycles de nutriments dans les SASP, aux niveaux des terroirs, ménages, parcelles 	<ul style="list-style-type: none"> - Simulation informatique

Le présent manuscrit de la thèse est structuré en 4 chapitres (Figure 12). Les deux premiers chapitres correspondent à l'objectif méthodologique de représentation du fonctionnement de SASP diversifiés aux niveaux du ménage et du terroir villageois. Le premier chapitre, soumis à la revue *Cahiers Agricultures*, présente le modèle d'action qui a servi à construire la composante décisionnelle du modèle de simulation de type SMA. Il montre comment une diversité d'activités et de comportements de ménages face à un aléa climatique sont représentés par le modèle proposé. En effet, le climat est un aléa majeur auquel sont confrontés les SASP en Afrique de l'Ouest. Le deuxième chapitre, soumis à la revue *Environmental Modelling & Software*, décrit le modèle de simulation intégrant les composantes décisionnelles et biophysiques, ainsi que l'évaluation du modèle sur des études de cas contrastées. Ce chapitre insiste sur l'importance d'articuler divers niveaux d'organisation de la parcelle au terroir villageois pour une juste représentation du fonctionnement des SASP. Le troisième chapitre, soumis à la revue *Agricultural Systems*, répond à l'objectif thématique de la thèse, à savoir l'analyse des conséquences de la transition agraire dans le bassin arachidier sur la réorganisation du cycle de l'N. Le quatrième chapitre correspond à la discussion générale de la thèse, il discute de l'évolution du cycle de l'N, de la généricité du modèle construit et plus généralement des dynamiques d'intensification et d'individuation des SASP décrites ici pour le bassin arachidier du Sénégal.

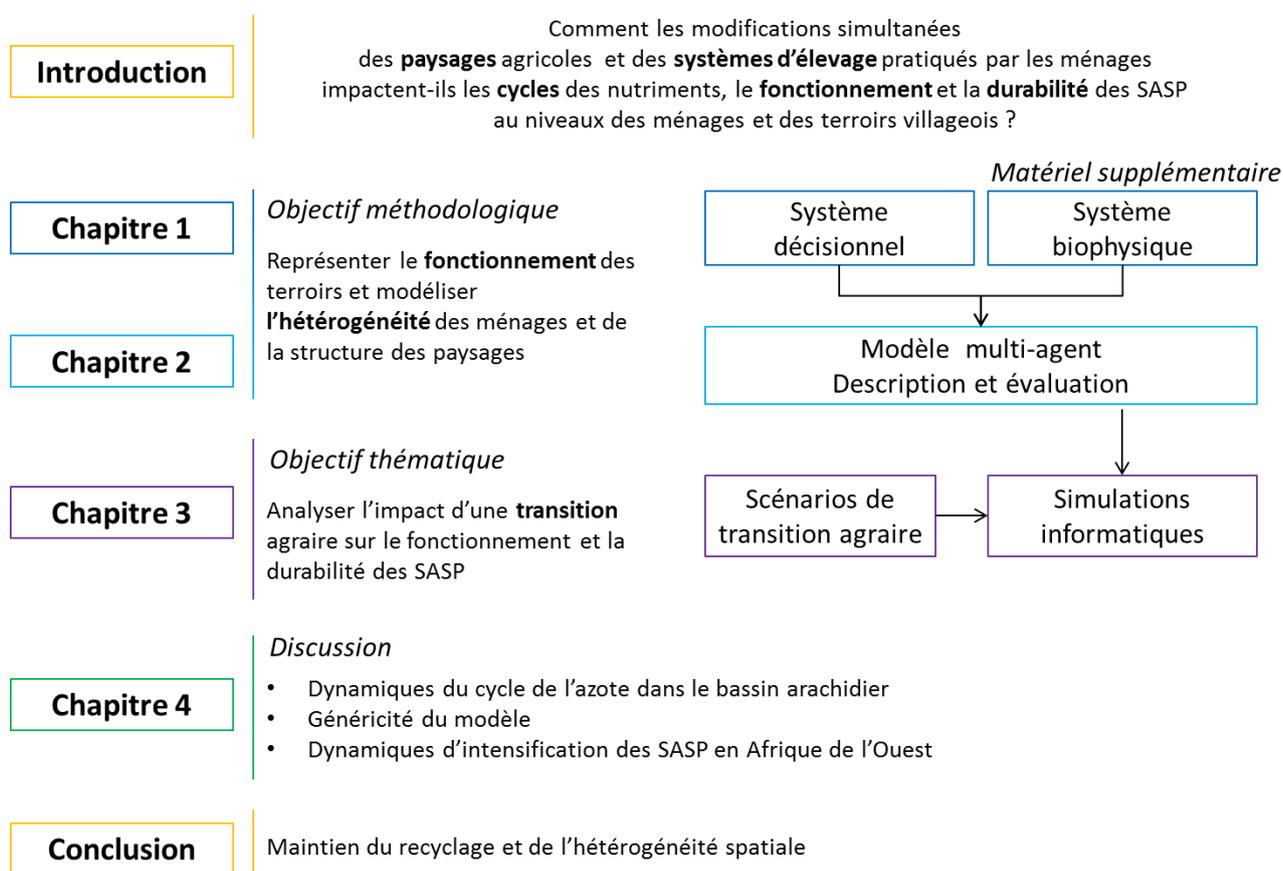


Figure 12. Structure du manuscrit

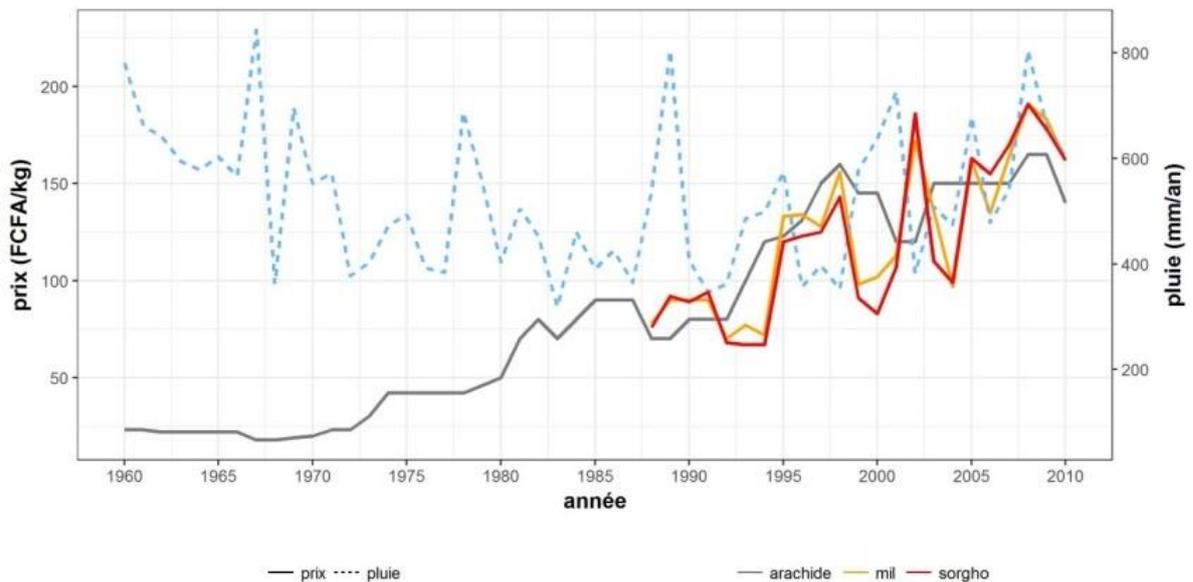
2 Chapitre 1: Modélisation de la gestion de la matière organique en systèmes agro-sylvo-pastoraux

Ce chapitre se base sur l'article soumis à la revue Cahiers Agricultures le 09/01/2018, chez l'éditeur.

Grillot, M., Vayssières, J., Guerrin, F., Lecomte, P., à venir. Modéliser la gestion adaptative des ressources organiques pour étudier la flexibilité des agroécosystèmes. Cahiers Agricultures.

Cet article traite des pratiques paysannes et de leur modélisation pour représenter la gestion des ressources, en particulier des ressources organiques. Il a pour objectif de décrire un modèle d'action se situant aux niveaux décisionnels tactique et opérationnel. Ce modèle conceptuel, appliqué aux SASP décrits dans le bassin arachidier du Sénégal, intègre l'effet de l'aléa pluviométrique sur la réalisation des opérations techniques à l'origine des flux de biomasses.

Dans ce chapitre on s'intéresse principalement à l'aléa pluviométrique. Bien qu'aucune variable économique ne soit étudiée ici, il est à noter que la quantité de pluie impacte fortement les récoltes et prix des produits vivriers (Figure 13).



Pluviométrie : CNRA Bambey ; Recensement des prix : Commissariat à la Sécurité Alimentaire (CSA)

Figure 13. Evolution du prix de denrées alimentaires et de la pluviosité au Sénégal

Modélisation conceptuelle de la gestion adaptative de la biomasse face à l'aléa climatique en système agro-sylvo-pastoral

Conceptual modelling of adaptive biomass management facing climate risk in agro-silvo-pastoral systems

Myriam Grillot^{a,b,*}, Jonathan Vayssières^{a,b}, François Guerrin^{b,c}, Philippe Lecomte^{a,b}

^a CIRAD, UMR SELMET, Dakar, Sénégal ; SELMET

^b Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

^c INRA, UMR SELMET, F-34398 Montpellier, France; SELMET

* Corresponding author. E-mail addresses: myriam.grillot@gmail.com (M. Grillot), jonathan.vayssieres@cirad.fr (J. Vayssières)

2.1 Résumé

Le recyclage de la biomasse joue un rôle central dans le fonctionnement des systèmes agro-sylvo-pastoraux. En Afrique de l'Ouest, de forts aléas climatiques, et notamment la variabilité des précipitations atmosphériques, impactent et complexifient la gestion de cette biomasse. Modéliser ces systèmes requiert la prise en compte des liens réciproques de cause à effet entre les actions des ménages agricoles, les processus biophysiques et l'évolution de l'environnement. Contrairement à la représentation en saisons-pratiques, cette étude décrit un modèle d'action conceptuel, de type « arbre de décisions », basé sur des règles « si-alors-sinon » qui représentent, de manière adaptative et détaillée, les décisions de gestion de la biomasse du ménage agricole.

Cette étude souligne les nombreuses conséquences « en cascade » d'un aléa pluviométrique sur les actions concernant le calendrier autant que les quantités et la nature des biomasses mobilisées. Les activités les plus directement impactées sont le semis et la récolte des cultures et l'alimentation animale, et indirectement, la fertilisation des terres cultivées et la gestion des stocks de biomasse alimentaires (vente, achat et échanges entre ménages).

Le modèle d'action est défini pour 4 types de comportements correspondant à 4 types de ménages d'exploitations mixtes agriculture-élevage définis selon leurs activités dominantes : agriculture *versus* élevage-dominant, et vivrier *versus* rente-dominant. Les ménages vivriers et élevage-dominants sont plus sensibles aux variations pluviométriques. Ils présentent une gestion plus adaptative car ils sont davantage dépendants des biomasses produites localement.

Ce modèle d'action, a été conçu en vue de son intégration dans un modèle à base d'agents pour simuler notamment des aléas pluviométriques et les conséquences d'une diversité de comportements de ménages, en interaction, sur les flux de biomasses au niveau d'une communauté villageoise en Afrique de l'Ouest.

Mots clés : pratique agricole ; aléa climatique ; gestion de la biomasse ; modèles ; Sénégal

2.2 Abstract

Biomass recycling plays a key role in the functioning of agro-silvo-pastoral systems. In West Africa, strong climatic hazards, particularly the variability of atmospheric precipitation, impact and complicate the management of this biomass. Modeling these systems requires the consideration of reciprocal links of cause and effect between the actions of farm households, biophysical processes and environmental change. Contrary to the representation in practical seasons, this study describes a conceptual model of action, using "decision tree" analysis and based on "if-then-else" rules which represent, in an adaptive and detailed way, the management decisions of the biomass by the farm household.

This study underlines the numerous "cascading" consequences of rainfall risk in terms of the adjustment of the timing of the action as well as the quantities and the nature of the mobilized biomasses. The most directly impacted activities are the planting and harvesting of crops and animal feed, and indirectly, the fertilization of cropland and the management of biomass food stocks (sale, purchase and trade between households).

The action model is defined for 4 types of behaviors corresponding to 4 types of mixed agriculture-livestock farming households defined according to their dominant activities: agriculture versus livestock-dominant, and food versus income-dominant. Food and livestock-dominant households are more sensitive to rainfall variations. They present a type of management that is more adaptive because they are more dependent on locally produced biomasses.

This model of action was designed for its integration into an agent-based model to simulate climatic hazards and the consequences of a diversity of behaviors of interacting households, on biomass flows at the community level in a typical West African village.

Keywords: agronomic practices; weather hazards; biomass management; models; Senegal

2.3 Introduction

En Afrique de l'Ouest, les systèmes agro-sylvo-pastoraux (SASP) dominent. Ils sont fortement contraints par des sols pauvres, une pluviosité limitée et une faible disponibilité en biomasses (déjections animales, résidus de récolte, etc.). Dans ces systèmes, les quantités d'intrants utilisées sont faibles et les pratiques agricoles se basent sur le recyclage de la biomasse entre les activités de cultures et d'élevage, comme observé au Burkina Faso (Freschet et al., 2008), Mali (Blanchard et al., 2013), Niger (Achard and Banoin, 2003), et Sénégal (Audouin et al., 2015; Garin et al., 1990).

L'aléa sur la quantité de pluie tombée est fort (Perret, 2008) et plusieurs années consécutives de sécheresses mettent régulièrement ces systèmes à l'épreuve du fait d'une moindre disponibilité en biomasses (ex. à la fin des années 1960 et 1980). Zampaligré et al. (2014) au Burkina Faso et Mertz et al. (2011) au Sénégal ont montré que les agro-éleveurs intègrent l'évolution du climat dans la conduite de leurs activités agricoles. Différentes stratégies facilitant l'adaptation des systèmes ont été discutées : migrations humaines (Roquet, 2008) ; mobilité des animaux (Leclerc and Sy, 2011) ; utilisation de variétés cultivées multiples à cycles plus ou moins longs (Muller et al., 2015) ; dispersion des champs dans l'espace en réponse à la variabilité spatiale de la pluie (Akponikpè et al., 2011) ; etc. L'évolution du climat en Afrique de l'Ouest dans les prochaines décennies est incertaine, mais le risque d'accentuation de la variabilité climatique et de récurrence d'évènements extrêmes (dont les sécheresses) est important (Guichard et al., 2015). Mieux décrire et comprendre les décisions et actions des agriculteurs est important pour accompagner les systèmes agricoles dans leur adaptation au changement climatique (Cerf and Sébillotte, 1997; Edwards-Jones, 2006).

Le modèle d'action est un concept utile dans ce cas ; comme décrit par Cerf et Sebillotte (1988) et par Aubry et al. (1998), il est représenté par : (i) un ou plusieurs objectifs généraux, (ii) une planification des actions, et (iii) un jeu de règles de décision et d'indicateurs pour la décision. Le modèle d'action sert de base aux décisions, prises « en temps réel » au cours du processus de production et qui aboutissent à la réalisation des opérations techniques (i.e. actions quotidiennes ; ex. alimentation animale, épandage du fumier, semis) (Fountas et al., 2006). L'essentiel des études s'intéressant à l'adaptation des systèmes agricoles face à la variabilité et au changement climatique se situent au niveau décisionnel stratégique, i.e. long terme (ex. Zampaligré et al. (2014), Descheemaeker et al. (2016)). Les travaux se situant au niveau décisionnel tactique, i.e. sur un pas de temps plus court (mensuel), proposent généralement un plan d'action découpé en saisons-pratiques (ex. Audouin et al., (2015), Dounias et al. (2002)). Ils ne permettent toutefois pas de mettre en évidence les adaptations quotidiennes des opérations techniques, alors que ces opérations peuvent fortement impacter la gestion de la biomasse (Vayssières et al., 2007).

L'objectif de cet article est de décrire un modèle d'action se situant aux niveaux décisionnels tactique et opérationnel, intégrant l'effet de l'aléa pluviométrique sur la réalisation des opérations techniques à l'origine des flux de biomasses. Les hypothèses de ce travail sont: i) la forte variabilité interannuelle de la pluviométrie (niveau et répartition dans le temps des pluies) affecte la disponibilité de la biomasse et donc les pratiques qui lui sont associées, ii) ces pratiques de gestion de la biomasse comprennent des ajustements au sein de l'année avec des conséquences sur la gestion de cette biomasse à des pas de temps courts inférieurs à celui des saisons-pratiques (Vayssières et al., 2007).

Dans les systèmes agricoles ouest-africains, une partie des biomasses utilisée pour l'alimentation des animaux est gérée et utilisée collectivement, ex. végétation des parcours, résidus de cultures laissés sur les champs. Ainsi ce travail de modélisation conceptuelle s'intéresse aux décisions prises par les ménages et aux interactions possibles entre ménages au sein du terroir villageois auquel ils appartiennent. La notion de « terroir » dans cette étude correspond à la définition africaniste de Sautter (1962) : « l'espace dont une communauté agricole, définie par des liens de résidence, tire l'essentiel de sa subsistance : autrement dit la portion du sol environnant où se localisent les champs et paît le bétail, dans la mesure où celui-ci se trouve associé d'une façon ou d'une autre à la culture », une définition encore bien d'actualité aujourd'hui (Bassett et al., 2007).

2.4 Matériel et méthodes

2.4.1 Cas d'étude

La zone d'étude est située dans le bassin arachidier au centre du Sénégal dans l'observatoire Population, Santé et Environnement de Niakhar (Delaunay et al., 2013). L'observatoire couvre 203km² et a suivi de 65 puis 30 terroirs sur la période 1962-2017. La croissance démographique, similaire à la croissance nationale, est d'environ +3%/an depuis le début des années 2000 (Delaunay et al., 2013). Le climat est sahélo-soudanien avec une pluviosité très variable de 590 ±170 mm (Figure 10 ; ISRA-CERAAS, communication personnelle). L'année peut-être découpée en trois saisons de 4 mois : l'unique saison des pluies (SP), débutant au plus tard début juillet et se terminant fin octobre, suivie d'une saison sèche froide (SSF) à partir de novembre, puis d'une saison sèche chaude (SSC) qui débute en mars.

Les activités agricoles se concentrent en SP. Les céréales sèches (mil, sorgho) sont la principale culture de la zone (Audouin et al., 2015; Lericollais et al., 1999). L'arachide est la seconde culture en termes de surface et c'est la principale culture de rente. Les systèmes agricoles de la zone d'étude sont des SASP représentatifs de la majorité des situations en Afrique de l'Ouest tels que décrits en introduction. Dans les terroirs de l'observatoire, le bétail est la principale source de fertilisation et a permis de fumer 25% des terres dans les années 2010 (Audouin et al., 2015). L'activité d'embouche des ruminants s'est développée dans la zone depuis les années 1990, avec des niveaux d'importance différents selon les terroirs (Garin et al., 1990; Sow et al., 2004).

2.4.2 Identification et quantification des flux de biomasses

Dans l'observatoire de Niakhar trois terroirs ont été sélectionnés pour leur diversité : Diohine, un terroir de type « traditionnel » avec présence d'une jachère collective et une forte propension à l'élevage extensif et à l'agriculture de subsistance ; Barry, un terroir où les activités de rente sont plus développées notamment l'embouche de ruminants ; Sob, un terroir davantage tourné vers les cultures de rente : l'arachide et la pastèque qui s'y développent depuis 2013.

Des enquêtes ont été menées auprès de l'ensemble des ménages agricoles des trois terroirs, et sur l'ensemble des activités agricoles afin d'identifier et quantifier les flux de biomasses annuels au niveau des ménages (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015). Concernant les cultures, les données sur l'assolement, les périodes de semis, les dates et quantités des fertilisations organique et minérale et de récoltes ont été enregistrées ; pour l'élevage, les pratiques d'alimentation à l'auge (pour l'embouche) et pastorales (pour l'élevage extensif) et la localisation du parcage nocturne ont été recensées. La consommation des ménages en aliments et combustibles a également été quantifiée, du fait de la part importante d'autoconsommation (Audouin et al., 2015; Lericollais et al., 1999). A partir des enquêtes menées et de la littérature produite sur la zone, les activités des ménages de la zone ont été décrites selon le calendrier saisonnier (SP, SSC, SSF).

2.4.3 Typologie de ménages et extraction du modèle d'action

Quatre types de ménages sont différenciés dans les trois terroirs enquêtés, selon une typologie décrite par Balandier (2017). Les principales variables discriminantes sont (Table 2) :

- Importance des cultures vivrières (céréales, niébé) *versus* de rente (pastèque, arachide) ;
- Importance des différents systèmes d'élevage extensif *versus* intensif (embouche ovine et bovine) ;
- Rapport entre activités d'élevage et activités de cultures (chargement animal par hectare).

On distingue les ménages vivriers orientés cultures (VC) ou élevage (VE), les ménages rentiers orientés culture (RC) ou élevage (RE). Les ménages vivriers représentent 80% du terroir de Diohine, tandis que les ménages rentiers représentent respectivement 67 et 55% des terroirs de Barry et Sob.

Table 2. Caractéristiques structurelles des 4 types de ménage (Orientés vivrier-culture (VC), rente-culture (RC), vivrier-élevage (VE), ou rente-élevage (RE))

Type	Vivrier		Rente	
	Orienté culture (VC) n = 48	Orienté élevage (VE) n = 59	Orienté culture (RC) n = 80	Orienté élevage (RE) n = 36
SAU (ha)	4,23 ±2,18 ^b	3,45 ±1,95 ^b	5,99 ±3,14 ^a	6,30 ±4,51 ^a
SC (ha)	3,73 ±1,72 ^b	3,05 ±1,67 ^b	5,83 ±3,14 ^a	6,25 ±4,49 ^a
habitants permanents (unité)	3,49 ±2,60 ^a	5,31 ±3,06 ^a	5,22 ±3,48 ^a	9,64 ±6,39 ^b
animaux de traction (unité)	1,29 ±0,81 ^b	1,28 ±0,83 ^b	2,31 ±2,78 ^a	1,99 ±1,37 ^{ab}
surfaces en cultures vivrières (% SC)	62 ±21 ^{ac}	78 ±17 ^b	56 ±20 ^a	70 ±16 ^{bc}
surfaces en cultures de rente (% SC)	38 ±21 ^{ac}	22 ±17 ^b	44 ±20 ^a	30 ±16 ^{bc}
surface en jachères (% SAU)	9 ±11 ^b	9 ±14 ^b	3 ±7 ^a	1 ±2 ^a
ruminants à l'embouche (%)	3 ±11 ^b	14 ±28 ^b	27 ±32 ^a	57 ±28 ^c
ruminants au pâturage (%)	89 ±29 ^c	71 ±41 ^a	67 ±36 ^a	40 ±27 ^b
chargement animal (UBT/ha SC)	0,87 ±0,75 ^b	1,03 ±0,84 ^{ab}	1,19 ±0,74 ^{ab}	1,36 ±1,34 ^a

SC = surface cultivée ; SAU = surface agricole utile ; UBT (unité bovin tropical) : 1 UBT = un animal de 250kg de poids vif ; les lettres en exposant représentent les groupes de classes homogènes par variable (test ANOVA, p<0,1)

Cinq ménages ont été suivis mensuellement sur un an, de mai 2015 à juin 2016. L'objectif était de (i) décrire les pratiques agricoles dans les trois terroirs, (ii) proposer une vision dynamique intra-annuelle des pratiques de gestion de la biomasse, (iii) décrire les sources d'ajustements des opérations techniques de gestion de la biomasse. Ces ménages ont été choisis au sein des trois terroirs afin de couvrir la diversité : deux ménages de type VC, le plus répandu ; un de type RC ; un de type VE ; un de type RE. L'échantillonnage réduit a permis un suivi fin et régulier de la majorité des activités agricoles et l'observation des opérations techniques menées par les différents membres du ménage (distingués selon l'âge et le genre), tel que suggéré par [Vayssières \(2004\)](#). Chaque mois, ce suivi s'est concentré sur la confrontation des opérations techniques prévues et effectivement réalisées afin d'identifier les ajustements et leurs origines. Cela a servi à construire le modèle d'action, i.e. le plan d'action et les règles d'ajustement du calendrier (= dates), des intensités (= quantités), des origines et des destinations des opérations techniques à l'origine de flux de biomasses.

2.5 Modèle d'action

2.5.1 Calendrier et ajustement des dates de début et de fin des activités agricoles

Dans les trois terroirs étudiés, l'essentiel des cultures sont pluviales. Le calendrier des activités agricoles, représenté en [Figure 14](#), s'ajuste chaque année. La préparation des champs se fait surtout en SSF. Elle comprend l'épandage du fumier dans les champs et le nettoyage de ces champs pour faciliter le passage des semoirs. Plus le fumier est abondant plus tôt son épandage intervient. Le début de la SP est une période de travail intense, les travaux s'organisent selon un système de règles donnant priorité aux cultures vivrières (céréales) et aux champs de case (proches des habitations) pour sécuriser l'alimentation du ménage. Le semis des céréales se réalise avant le début des pluies sur décision d'un comité villageois L'arachide et cultures en association telles que le niébé sont semées aux premières pluies. Un re-semis peut être nécessaire en cas de précipitations trop espacées dans le temps au début de la SP. Les cultures sont matures à partir de fin septembre, selon la précocité des variétés (ex. mil à cycle court de 90 jours *versus* à cycle long de 120 jours). Les variétés de niébé précoces sont récoltées au cours de la SP, à la période de soudure pour l'alimentation humaine. Plus les stocks d'aliments sont faibles en début de SP, plus tôt les ménages récoltent les cultures secondaires pour une consommation en frais. Les dates de récolte des cultures sont fortement dépendantes de la pluviométrie de la SP en cours.

Activité	Information	Saison des pluies				Saison sèche chaude				Saison sèche froide			
		juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai
Climat	Pluie												
Culture	Fertilisation organique												
	Semis												
	Nettoyage, sarclage, démarayage(1)												
	Récolte												
Alimentation élevage extensif	Végétation herbacée												
	Résidus de culture												
	Végétation arborée												
	Pailles stockées												
Parcage élevage extensif	Jachère												
	Champs de case												
	Champs de brousse												
Élevage d'embouche	Période d'engraissement												

(1) opération qui consiste à ne garder que la plantule la plus vigoureuse dans un poquet de plusieurs

Figure 14. Calendrier des activités agricoles et ajustement des dates de début et de fin des activités
Les parties en noir correspondent aux périodes de pleine activité et les parties en dégradés de gris correspondent aux périodes de mises en route et finalisation des activités, variables selon la pluviométrie de l'année en cours ou précédente

Les troupeaux conduits en extensif sont mobiles dans tout le terroir mais limités aux jachères et parcours durant la SP. En début de SSC, la finalisation des récoltes déclenche le pâturage des résidus de culture par les troupeaux (vaine pâture). Dès lors, les troupeaux ont accès à l'ensemble du terroir, les animaux pâturent la journée et sont parqués dans les champs de case la nuit. En SSF les ressources fourragères sont limitées et les animaux parcourent des distances plus importantes dans le terroir pour s'alimenter. Plus la productivité végétale du terroir est basse (cas d'années sèches notamment) et plus tôt les animaux sont complétés avec les résidus de culture stockés (pailles de céréales et fanes de légumineuses) et plus tôt les arbres fourragers sont émondés (principalement *Faidherbia albida*). Une partie des animaux est transhumante et généralement présente dans le terroir uniquement pendant la période de vaine pâture. La durée de la vaine pâture est proportionnelle à l'abondance des pluies. Concernant l'élevage intensif, les cycles d'engraissement sont relativement fixes, ils correspondent à des périodes de 3 à 4 mois basées sur l'offre et la demande. La demande en bovin engraisés est fortement saisonnée, elle est forte en SSF et en tout début de SP. La demande en ovins engraisés est fortement dépendante des dates des fêtes religieuses.

2.5.2 Conséquences des ajustements sur l'importance des flux de biomasses

La variabilité de la pluviométrie impacte la production végétale naturelle et cultivée. Une année pluvieuse permettra de produire davantage de ressources végétales qu'une année sèche, ce qui impacte les flux. L'alimentation des troupeaux mobilisant des quantités importantes de biomasses locales, on compare ici qualitativement, pour les deux types de ménage orientés élevage, les différences de flux entre une année pluvieuse et une année sèche (cf. Figure 15).

Pour le type VE, pratiquant l'élevage extensif, l'alimentation animale est essentiellement basée sur les ressources locales. Lors d'une année pluvieuse les flux transitent davantage par le compartiment « sol-plante » que lors d'une année sèche. Lors d'une année pluvieuse, la production végétale est suffisante pour couvrir, au moins la majorité des besoins humains et animaux de l'année. Les parcelles du ménage participent à l'alimentation des autres troupeaux du terroir, tout en bénéficiant de leurs excréta. Le grenier peut présenter des surplus qui sont vendus ou stockés pour l'année suivante (dans la perspective d'une éventuelle année sèche). Dans le cas d'une année sèche, l'alimentation des animaux sur parcours est réduite. La production est déficitaire et les bilans annuels « entrées-sorties » au niveau des greniers sont nuls à négatifs. Bien qu'une partie des animaux parte en transhumance plus tôt à la recherche de parcours plus dotés en végétation, les ménages sont davantage contraints de compléter leurs animaux avec les pailles stockées. De même pour l'alimentation de leur famille, les ménages sont contraints d'importer davantage qu'en année pluvieuse.

Pour le type de ménage RE, l'alimentation des animaux à l'embouche est basée sur l'usage de pailles et de fanes stockées et d'aliments concentrés achetés sur le marché, quelle que soit la pluviométrie. Une année pluvieuse génère davantage de surplus et donc de ventes et de revenus provenant des cultures de rente qu'une année sèche. La disponibilité en fourrages et en trésorerie permet d'investir dans des lots d'animaux plus importants à l'embouche sans acheter davantage de fourrages. Inversement une année sèche conduit à moins d'animaux à l'embouche. Dans les deux systèmes, et particulièrement dans le système VE, une année pluvieuse se traduit par une production plus importante de déjections animales et de fumier. Par conséquent les champs sont généralement fertilisés plus abondamment les SSF qui suivent une SP plus pluvieuse.

Pour les ménages orientés culture (VC et RC), on retrouve la même tendance d'augmentation des imports dans le cas d'une année sèche, toutefois ce chargement est moins marqué étant donné que les activités de culture sont moins dépendantes des biomasses locales (uniquement fumier et déjections) que les activités d'élevage.

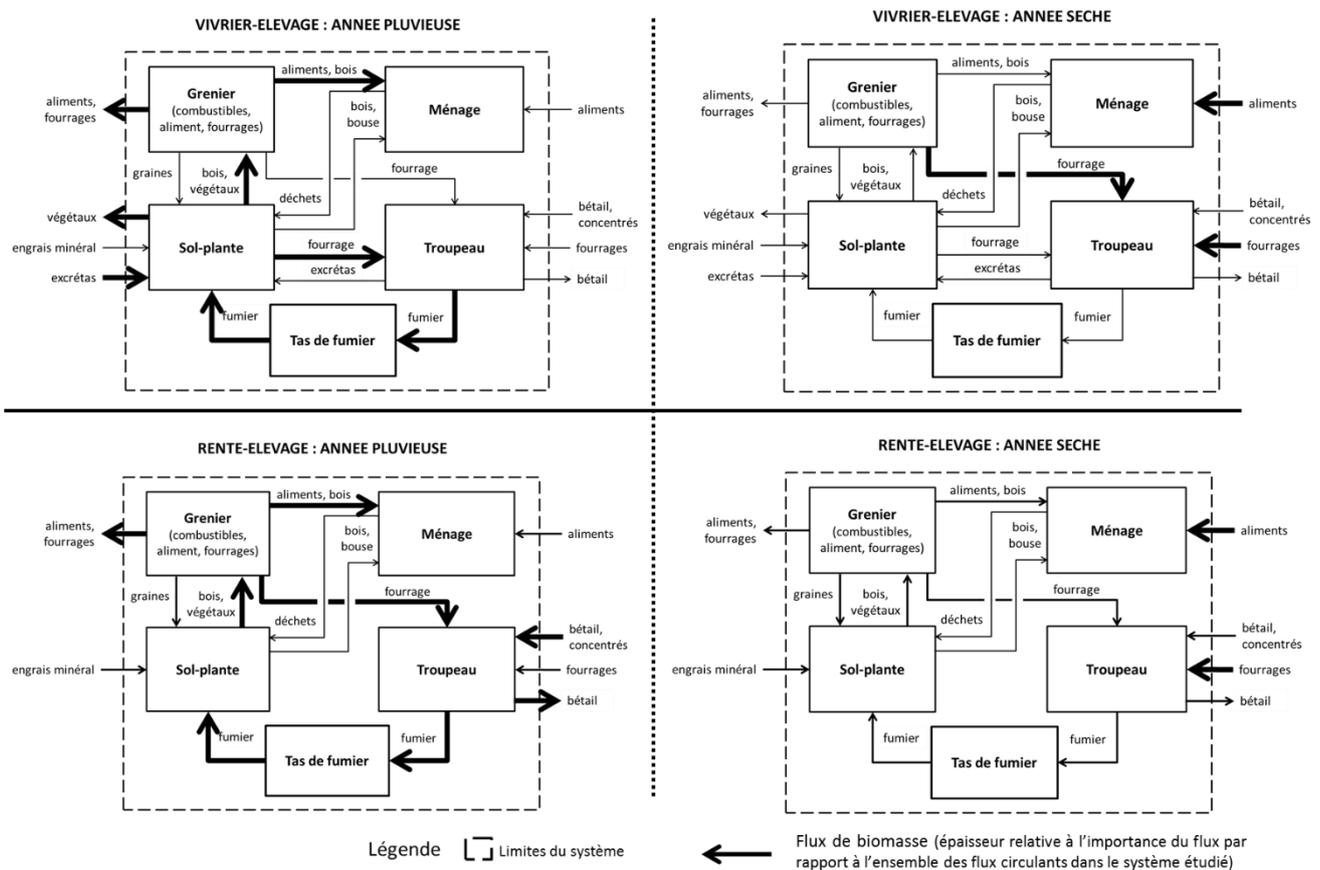


Figure 15. Impacts d'une année pluvieuse (gauche) et une sèche (droite) sur les modèles stock-flux des ménages
Exemple pour deux types de ménages orientés élevage : un vivrier (haut) et un rentier (bas)

2.5.3 Utilisation d'arbres de décision

Le modèle de décision est formalisé par des arbres de décisions correspondant à des règles conditionnelles « si-alors-sinon » qui définissent, en fonction d'indicateurs divers, les opérations techniques à effectuer chaque jour, ainsi que leur nature, i.e. les quantités de matière à déplacer, les stocks sources et cibles. Ce type de représentation est valable pour les activités de culture (épandage, semis, récolte), d'élevage (alimentation, parcage, achat/vente d'animaux) et de consommation humaine (alimentation, consommation de combustibles).

Ici on prend l'exemple de l'activité d'alimentation des animaux, la distribution de fourrages plus précisément. Un arbre décisionnel commun aux deux types d'élevage a été construit (Figure 16). Deux indicateurs sont pris en compte : le besoin en complémentation fourragère des animaux (Q1) et le niveau des stocks de fourrages (Q2). Pour les animaux conduits en extensif, le besoin Q1 est estimé en fonction de la disponibilité des fourrages à la vaine pâture (résidus de culture au champ) et au pâturage (fourrage sur pied dans les jachères et dans les

parcours). Plus cette disponibilité est élevée plus Q1 est faible. Pour les animaux en embouche les besoins évoluent essentiellement en fonction de l'état d'engraissement de l'animal. Si le besoin n'est pas nul, différentes options sont possibles pour l'éleveur. Si le stock est suffisant, l'éleveur puise dedans. Sinon, différentes opérations techniques sont menées, selon le type d'élevage. Les éleveurs peuvent émonder les arbres pour compléter leurs animaux conduits en extensifs. Ils n'échangent ou n'achètent des fourrages qu'en cas d'extrême nécessité. Les ménages pratiquant l'embouche ont davantage de trésorerie pour acheter des fourrages, ce qui est la pratique la plus courante, en cas de stock Q2 insuffisants.

Plus tôt le stock de fourrage est vidé (ex. suite à une année sèche, le stock est moins rempli que lors d'une année pluvieuse), plus tôt les opérations d'émondage des arbres et d'import d'aliments (échange ou achat) auront lieu. Le calendrier des différentes opérations s'adapte donc implicitement.

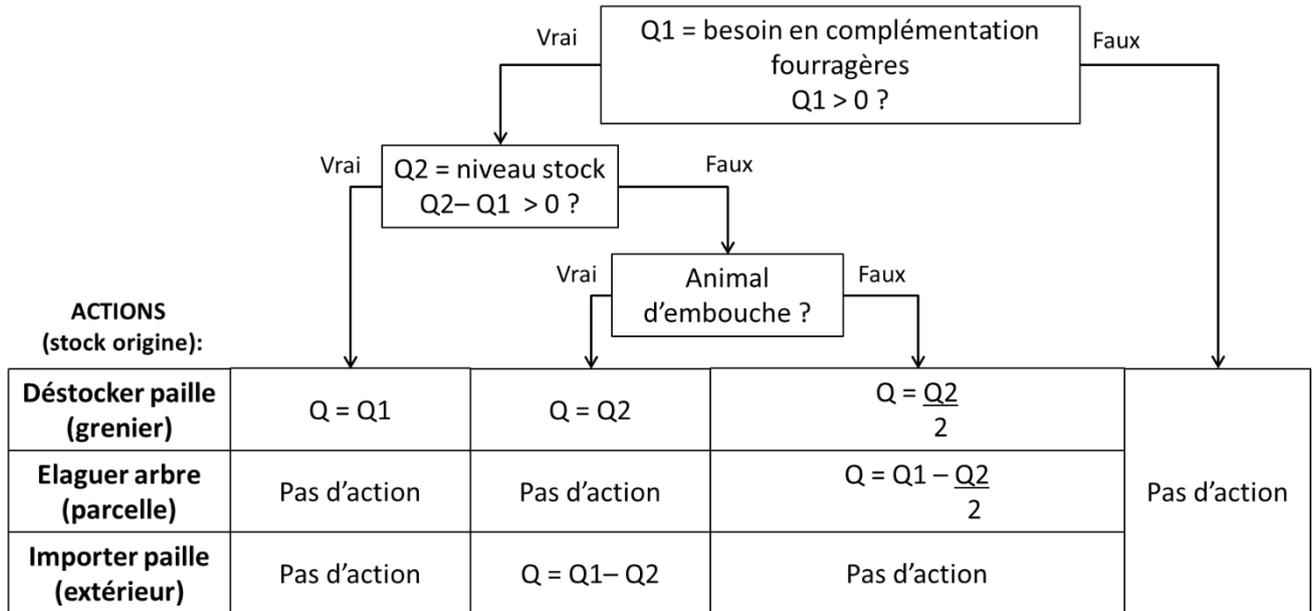


Figure 16. Arbre de décision pour le choix de l'origine et de la quantité Q de fourrages apportés aux animaux

2.6 Discussion

2.6.1 Conséquences de l'aléa pluviométrique sur les opérations techniques et les flux

Les effets directs de la variabilité climatique sur les cultures sont déjà bien connus (Sultan et al., 2013). Ils interviennent sur les dates de semis et de récoltes, ainsi que sur les quantités récoltées. De façon originale et complémentaire, cette étude souligne un ensemble d'effets en cascade sur les activités des SASP. En particulier, un arrière effet peut être observé d'une année sur l'autre. Par exemple, moins de ressources alimentaires pour les animaux en année n induit moins d'excréments animaux et donc moins de fumure disponible pour les champs, ce qui se traduit par une baisse des rendements culturels en année n+1 (cf. §2.5.2).

Les variations de la quantité de biomasse végétale produite dans le terroir impactent les activités agricoles différemment, selon le point d'entrée dans le diagramme des flux pour l'analyse du système. D'un point de vue temporel, le calendrier cultural est adapté à la répartition des pluies dans le temps avec un ensemble d'effets en chaîne sur les dates de récolte et les dates de changement de ressources fourragères, en particulier dans les systèmes vivriers (cf. §2.5.1). L'étude de l'organisation des flux entre les différents compartiments du ménage agricole met en évidence le possible recours à des biomasses produites à l'extérieur du ménage en cas d'une année sèche, en particulier dans les systèmes rentiers (cf. §2.5.2). Les activités d'élevage sont davantage impactées par cette réorganisation des flux que les activités culturales. Dans le cadre des activités culturales, le sol joue un rôle tampon grâce à sa capacité à stocker/déstocker les nutriments apportés par la fertilisation organique. Le système peut bénéficier de l'arrière effet d'apports conséquents de matière organique ayant eu

lieu les années pluvieuses antérieures (Freschet et al., 2008). Les stocks de biomasse végétale jouent également un rôle tampon face à la variabilité climatique par des mécanismes de report de stock.

L'existence de ces stocks dans les greniers ou sur pied (cas des arbres fourragers) permet d'effectuer des ajustements sur l'origine et la quantité d'aliments distribués aux animaux. Ces ajustements se traduisent par des rations fourragères variables selon les niveaux des stocks de fourrages (cf. §2.5.3). Des mécanismes d'ajustement similaires interviennent concernant les stocks d'aliments humains, par le jeu d'échange, achat et vente des produits végétaux et animaux. Enfin les troupeaux ont un rôle tampon grâce à leur capacité à valoriser des biomasses très diverses (Zampaligré and Schlecht, 2017) et à stocker/déstocker leurs réserves corporelles (Nozières et al., 2011). Toutefois, l'ensemble de ces mécanismes d'ajustement et d'amortissement perdent en efficacité si plusieurs années sèches se succèdent.

2.6.2 Sensibilité des ménages aux variations environnementales

Dans cette étude, la typologie basée sur la prédominance des activités se recoupe avec d'autres typologies développées en Afrique de l'Ouest, par exemple celle de Vall et al. (2006) au Burkina Faso. Les activités agricoles sont impactées différemment par les variations de pluviométrie. Chaque type de ménage étant caractérisé par leurs activités prédominantes, leur sensibilité à ces variations diffère.

Pour l'agriculture, ce sont les ménages vivriers ayant le moins de stocks alimentaires et de moyens financiers qui sont les plus dépendants de la pluviométrie. Les ménages VE sont particulièrement impactés par les variations de pluviométrie du fait que leurs animaux conduits en extensif sont essentiellement alimentés avec des ressources fourragères locales. Le système d'alimentation prévoit un ensemble d'ajustements sur le calendrier fourrager se traduisant par une mobilisation variable des différentes ressources disponibles dans le terroir.

Les systèmes rentiers et particulièrement ceux basés sur l'élevage d'embouche, apparaissent ici comme moins sensibles aux variations climatiques car ils mobilisent en majorité des biomasses produites à l'extérieur du terroir. Le principal facteur limitant est alors surtout la capacité à acheter les aliments concentrés, engrais et semences disponibles sur le marché. Les ménages rentiers sont, en contrepartie, plus sensibles à l'aléa économique, i.e. aux évolutions des prix des cultures de rente et des produits animaux que ne le sont les systèmes vivriers.

La cohabitation sur un même terroir de ménages de types différents confère une flexibilité à la communauté villageoise. Les ménages les moins sensibles à l'aléa pluviométrique fournissent de la biomasse aux plus sensibles les années sèches. Réciproquement, les ménages vivriers peuvent aider les ménages rentiers à traverser une période peu favorable d'un point de vue économique sur les marchés (Audouin et al., 2015). Cet équilibre est rendu possible par les activités de dons, échanges, ventes-achats de biomasses entre ménages (liées à la gestion des stocks de biomasse végétale). La vaine pâture, le parcage nocturne et l'existence d'espaces communs (jachères collectives et parcours naturels) favorisent la solidarité et les échanges entre ménages via les troupeaux qui contribuent à accroître la flexibilité globale du terroir (cas de Diohine). Cette solidarité entre ménages a tendance à disparaître dans les terroirs où les ménages rentiers sont davantage représentés (cas de Barry). Dans ce cas, d'autres mécanismes de solidarité interviennent via des transferts économiques issus de la diaspora (Lalou and Delaunay, 2015).

2.6.3 Pertinence d'un modèle d'action prévoyant des ajustements

Ce papier décrit les actions en réaction aux conséquences de l'aléa pluviométrique impliquant une variation de la disponibilité en biomasses. La principale limite du travail réalisé ici est méthodologique, les règles d'ajustement ont été identifiées dans le cadre d'un suivi sur une seule année. Les différentes adaptations interannuelles décrites dans ce papier ont donc été abordées par enquête et les ajustements intervenants d'une année sur l'autre n'ont pas pu être directement observés. Un suivi sur plusieurs années (incluant si possibles des années particulièrement sèches et pluvieuses) permettrait de valider par des observations les règles d'ajustement et le modèle d'action ici proposé, et d'évaluer quantitativement la réorganisation des flux de biomasses (cf. Figure 15).

Malgré cette limite, ce premier travail de formalisation a permis de poser les bases d'un modèle d'action conceptuel et adaptatif face à un aléa climatique. Il peut être utilisé pour représenter les actions d'un terroir agro-sylvo-pastoral présentant une hétérogénéité de ménages et de pratiques agricoles. Le modèle d'action est basé sur des « arbres de décision » communs à tous les ménages mais dont les indicateurs de décision et les règles « si-alors-sinon » diffèrent d'un type de ménage à l'autre. Ce formalisme permet ainsi une discrimination comportementale entre les différents types de ménages. Le fait de se détacher des saisons-pratiques permet d'intégrer des indicateurs qui peuvent avoir une évolution propre et indépendante d'un ménage à l'autre (ex. niveaux de stocks). Le modèle d'action permet de reproduire les réactions face aux variations de l'environnement, non négligeables de manière générale dans le contexte agricole (Barbier and Goulet, 2013). Ce modèle d'action a été conçu en vue de son couplage à un système biophysique (sensible aux variations de l'environnement) et de son intégration dans un modèle à base d'agent. Ce type de modèle permettra (i) d'intégrer les dynamiques d'évolution de l'environnement (dont la pluviométrie), (ii) de conserver l'hétérogénéité des ménages en gardant leur individualité comportementale, (iii) de simuler les interactions entre les différentes entités, telles que la compétition entre troupeaux pendant la vaine-pâturage, les échanges et les solidarités entre ménages, etc., (iv) de quantifier et analyser le recyclage de la biomasse et des nutriments entre les troupeaux et les champs cultivés et les transferts de fertilité dans le paysage. Cela permettra d'évaluer si les pratiques des agro-éleveurs confèrent ou non une flexibilité à l'agroécosystème face à un aléa climatique (Darnhofer et al., 2010; Dedieu and Ingrand, 2010).

2.7 Conclusion

Cette étude souligne l'intérêt de **modéliser la gestion adaptative** des biomasses pour comprendre l'importance des conséquences directes et indirectes de l'aléa pluviométrique sur les flux de biomasses intervenant dans les ménages et entre les ménages, au sein d'un terroir. La forte variabilité de la pluviométrie a de multiples effets en cascade sur la réalisation des opérations techniques. Ce travail de modélisation conceptuelle montre que l'adaptation des systèmes agro-sylvo-pastoraux est facilitée par des mécanismes d'ajustements au niveau des pratiques des ménages et mobilisant des effets tampons permis par le sol, les troupeaux. La diversité des ménages semble également jouer un rôle important dans la capacité d'adaptation de ces systèmes, via des échanges importants de biomasses entre les ménages d'un même terroir.

A l'issue de cette étude nous recommandons l'intégration de ces mécanismes d'adaptation aux aléas, notamment climatiques, dans les modèles de simulation, en vue d'une représentation réaliste du fonctionnement des systèmes agro-sylvo-pastoraux de savane sèche. Le **modèle d'action** ici proposé, de type « arbre décisionnel », permet de tenir compte de la diversité comportementale des ménages et de représenter ces multiples mécanismes d'adaptation. Son intégration dans un modèle de simulation à base d'agent pourrait permettre d'étudier par simulation la flexibilité des terroirs agro-sylvo-pastoraux face à l'aléa pluviométrique selon divers scénarios de pratiques (ex. élevage extensif *versus* d'embouche), de diversité de ménages (ex. population de ménage homogène *versus* hétérogène) et de configuration paysagère (ex. paysages favorisant la mobilité des troupeaux *versus* entièrement cultivés). La notion de flexibilité est un critère de durabilité qui pourrait gagner en importance, dans le cadre du changement climatique global. Malgré une forte incertitude sur les prévisions climatiques en Afrique de l'Ouest, certaines projections prévoient une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de sécheresse avec des conséquences hautement défavorables sur la productivité des agroécosystèmes et la sécurité alimentaire des populations.

2.8 Remerciements

Ces travaux ont été financés par l'Agence Nationale de la Recherche française (ANR) [Projet ANR-13-AGRO-002, CERA0, Programme Agrobiosphère].

3 Chapitre 2 : Description et évaluation du modèle multi-agents pour la simulation du fonctionnement et de la durabilité des SASP

Ce chapitre se base sur l'article soumis à la revue *Environmental Modelling & Software* en avril 2017, actuellement en seconde révision :

Grillot, M., Guerrin, F., Gaudou, B., Masse, D., Vayssières, J., à venir. Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model.

Cet article décrit le modèle multi-agents qui a été construit dans le but de représenter le fonctionnement des terroirs en tenant compte de l'hétérogénéité des ménages et de la structure des paysages. Il s'agit du modèle TERROIR.

Le cœur du modèle est centré sur les flux de biomasses naturels et d'origine agricole convertis en azote (N). Les différentes entités qui interagissent dans le modèle déplacent, produisent de la biomasse dans le territoire entre les différentes entités du socio-agro-écosystème étudié (champs, ménages, animaux, espaces non cultivés, etc.).

Dans ce chapitre, le modèle est évalué sur la base de comparaisons entre données d'observations (enquêtes) et de simulations pour les deux villages les plus contrastés de l'étude : Diohine, le village « traditionnel » et Barry, le village orienté embouche.

Le modèle a été implémenté sur la plateforme GAMA (version 1.7), spécialisée dans la représentation de la gestion d'agrosystèmes et la spatialisation des processus qui s'y déroulent (<http://gama-platform.org/>) (Grignard et al., 2013).

La mise en forme et le traitement des données ainsi que les représentations graphiques ont été réalisés avec R ([The R Foundation for Statistical Computing](http://www.r-project.org/)) (v. 3.4). Les données ont été traitées avec les packages suivants :

- H. Wickham, R. François, L. Henry; K. Müller (2017). *dplyr*: A Grammar of Data Manipulation (v. 0.7.2.)
- H. Wickham, L. Henry (2017). *tidyr*: Tidy Messy Data (v. 0.7.1.)
- H. Wickham (2017). *stringr*: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations (v. 1.2.0).

Les représentations graphiques ont été réalisées avec les packages suivants :

- H. Wickham. *ggplot2*: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2009 (v. 2.2.1.)
- Z. Gu (2017) *circlize*: Circular Visualization (v. 0.4.1)
- B. Auguie, A. Antonov (2016). *gridExtra*: Miscellaneous Functions for "Grid" Graphics (v. 2.2.1.).

Les représentations spatiales (ex : Annexe 2) ont été réalisées avec QGIS Geographic Information System « Lyon » (<http://qgis.org>) (v. 2.12.0.).

Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model

Myriam Grillot^{a,b*}, François Guerrin^c, Benoit Gaudou^d, Dominique Masse^{e,f}, Jonathan Vayssières^{a,b}

^a CIRAD, UMR SELMET, Dakar, Sénégal; SELMET, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

^b Dp PPZS, Pastoral Systems and Dry Lands –Institut de recherche sénégalais Hann BP2057, Dakar, Senegal

^c INRA, UMR SELMET, F-34398 Montpellier, France; SELMET, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

^d IRIT CNRS, Université de Toulouse – F-31062 Toulouse, France

^e IRD, UMR Eco&Sols – F-34060 Montpellier, France

^f LMI IESOL, Centre ISRA IRD Bel Air BP1386, Dakar, Senegal

* Corresponding author. Tel.: +33 (0)4 67 59 38 63.

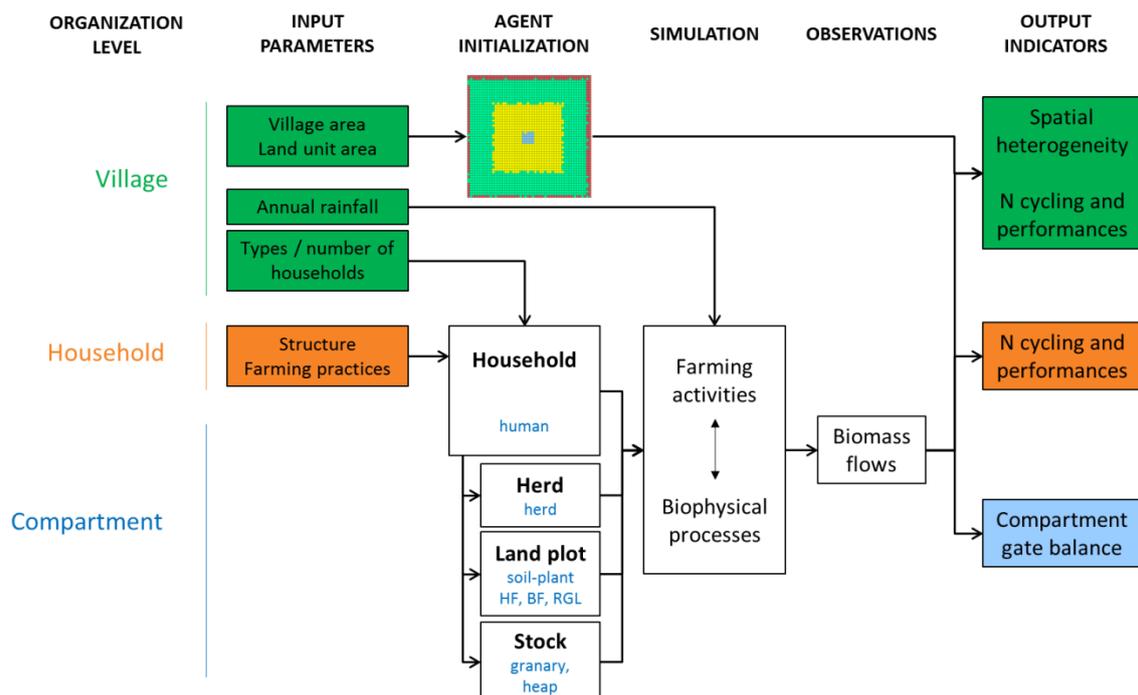
E-mail addresses: myriam.grillot@gmail.com (M. Grillot), jonathan.vayssieres@cirad.fr (J. Vayssières)

3.1 Abstract

Livestock-driven nutrient flows are the main sources of soil and crop fertilization in West African agro-sylvo-pastoral landscapes. They result from nutrient recycling between farm activities and the spatial transfer of nutrients within the landscape. “Extensive” systems, based on livestock mobility are tending to be replaced by more “intensive” systems based on in-barn livestock fattening. We built an agent-based model to compare these systems in terms of nitrogen cycling at land plot, herd, household and village levels. Model evaluation, based on field-data from two real contrasted villages, showed that the model satisfactorily reproduces the differences between an “extensive” and an “intensive” system with key parameters such as variability among households and soil fertility gradients. Simulations highlighted bottlenecks along the N cycle like accumulation of N in manure heaps and housing areas, reducing N recycling efficiency, especially in “intensive” systems. The model can be further used to explore new improved agro-sylvo-pastoral landscapes.

Keywords: biomass flows; crop-livestock integration; multi-agent system; multi-level modelling; nutrient spatial transfers; soil fertility management

3.2 Graphical abstract : model structure



3.3 Highlights

- The TERROIR agent-based model represents the N cycle within agro-sylvo-pastoral landscapes as a consequence of household decisions
- Two conceptual stock-flow models are interlinked to represent N recycling and spatial transfers
- The model enables detailed multi-level analysis of the N cycle from few input data collected at landscape level

3.4 Software availability

Software name: TERROIR model (version 1)

Developer contact address: Myriam Grillot, myriam.grillot@gmail.com

Year first available: 2017

Hardware required: Any recent PC with 200MB of disk space and a minimum of 4 Gb of RAM, 32 or 64 bits for Windows & Linux, and 64 bits for MacOS X

Software required: GAMA platform, version 1.7 (<http://gama-platform.org/>)

Availability: on open ABM (<https://www.openabm.org/model/5608/version/3/view>)

Cost: free for non-commercial use

3.5 Introduction

Crop-livestock systems encompass a variety of systems that take advantage of positive interactions between crop and livestock activities. These interactions can be materialized by different types of flows: biomass, nutrient, energy or cash flows. In West Africa, crop-livestock systems dominate rural areas (Herrero et al., 2010). With limited access to inputs, these “extensive” systems are typically agro-sylvo-pastoral systems (Powell et al., 2004). Biomass is recycled between crops, trees and livestock; e.g. crop residues and woody products are used to feed livestock and, conversely, livestock excreta (dung and urine) are key fertilizers for crops (Blanchard et al., 2013). Consequently, these systems are characterized by high **nutrient recycling** rates between farming activities (Rufino et al., 2009b). The systems are traditionally based on livestock mobility, free-grazing and night corralling practices, which have two major implications for the management of rural villages in which they are implemented.

The first implication is strong **interactions between households** (in West Africa, the term ‘household’ is equivalent to ‘farm’) through livestock-driven biomass flows. Households with few livestock and large crop areas are biomass and nutrient providers, through crop residues, to households with more animals per cropping area (Tittonell et al., 2015). Households coordinate to favor livestock mobility within the landscape; in this case, they manage common grazing areas (e.g. rangelands) and organize livestock corridors connecting rangelands and croplands (Dugué, 1998). Fertility is disseminated throughout the landscape thanks to animal excreta.

The second implication is livestock-driven **nutrient spatial transfers** between land units within the village territory (Hiernaux et al., 1997). Land units are defined as homogeneous parts of the village in terms of land use, management practices and biophysical processes (Zonneveld, 1989). In West Africa, village landscapes are classically structured in four concentric rings, corresponding to four land units (Manlay et al., 2004a; Ramisch, 2005). Starting from the center and moving toward the periphery, they comprise:

- (i) the “housing area”, where the homesteads are located;
- (ii) “home fields”, close to the , where the organic matter is concentrated in order to insure food security through the production of staple foods;
- (iii) “bush fields”, where cash crops are usually grown and fallow is organized for livestock corralling and grazing during the cropping season;
- (iv) “rangelands”, forming the outermost ring of the village area, often corresponding to less fertile areas.

Most of the year (except during the wet season), livestock graze in croplands and rangelands during the day and excrete in the home fields during night corralling. These practices drive nutrient spatial transfers from peripheral land units (rangelands and bush-fields) to core land units (home fields), resulting in a gradient of increasing soil fertility from the periphery to the center of the village (Manlay et al., 2004b; Tittonell et al., 2007b).

Due to high demographic growth in West Africa, the demand for crop and livestock products is rapidly increasing, leading to the expansion of croplands onto rangelands, thereby constraining livestock mobility (Dugué, 1998). Consequently, the number of livestock and corresponding organic matter production are decreasing with a serious risk of soil fertility and crop productivity decline, as already pointed out by Pieri (1989), Lericollais (1999) and more recently by Agegnehu and Amede (2017). Two strategies to maintain livestock activities are commonly observed: traditional “extensive” villages with organized fallows to isolate free-grazing livestock from crops, and “intensive” villages that are tending to abandon free grazing and changing to in-barn livestock fattening. “Intensive” systems mobilize more resources per hectare than the extensive systems, as they involve the purchase of large quantities of feed concentrate for animal fattening (Sow et al., 2004). These two situations differ in terms of nutrient imports and in their management of organic matter as in the “extensive” system, excreta are directly deposited on the field by the animals, but are managed by humans as solid manure in the “intensive” system. This paper addresses the following questions: what are the differences between the two systems in terms of nutrient cycle organization? And, in both systems, what are the limiting steps, i.e. bottlenecks that occur along the nutrient cycles and affect nutrient recycling efficiency and soil fertility?

Stock-flow simulation models are useful tools to analyze crop-livestock systems, including agro-sylvo-pastoral systems. These models describe interactions between the system components to describe system functioning and performance, generally at farm level (Thornton and Herrero, 2001); see for instance farm representations through biomass flows by GANESH in Madagascar (Naudin et al., 2015), or through nutrient flows by NUANCES-FARMSIM in East Africa (van Wijk et al., 2009) or by SIMFLEX in Burkina Faso (Sempore et al., 2015). Farm simulation models are also used to analyze flows at the village level based on extrapolations from simulations made at the farm level (Andrieu et al., 2015; Rufino et al., 2011). However they do not account for interactions between farms and the spatial organization of the villages. These two limits can be overcome using multi-agent models, which represent interactions between individuals (e.g. agents representing farms) and their dynamics in a given landscape (Bousquet and Le Page, 2004; Ferber, 1995).

Some agent-based models (ABM) were built to study crop-livestock systems, particularly through the calculation of biomass, nutrient or carbon flows. Each model has particular advantages: CaTMAS focuses on the role of fallow in the return of organic matter to the soil (Belem et al., 2011); PALM focuses on labor and economic flows (Matthews, 2006); SABLE and AMBAWA focus on the different uses of crop residues as a key biomass (Baudron et al., 2015; Diarisso et al., 2015). However, due to their reduced scopes, these models do not fully represent the biomass and nutrient cycles. In addition, night corralling, a key practice that determines nutrient spatial transfers, is not taken into account in AMBAWA, CaTMAS and PALM. In SABLE, night corralling is implemented, but the corresponding spatial transfers are not represented. Consequently, existing ABMs do not combine representations of household and landscape levels (i) interactions between crop and livestock activities, (ii) livestock-driven interactions between households, (iii) nutrient spatial transfers; whereas there is a need to take these processes into account to analyze the nutrient cycle in agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa.

For these reasons, we built the TERROIR computer model — TERRoir level Organic matter Interactions and Recycling model — to assess **soil fertility management** and the **nutrient recycling efficiency** of agro-sylvo-pastoral landscapes. It is a spatially-explicit ABM that integrates nutrient cycling at different organizational levels (land plot, herd, household and village). The version of the model described here focuses on nitrogen (N) as a key limiting resource for both plant and animal production in West African agro-ecosystems (Schlecht et al., 2006). It is coded with Gama (v1.7), a multi-agent simulation and spatially explicit modeling platform (Grignard et al., 2013; Taillandier et al., 2014).

The next section (§3.6) describes the architecture and the following (§3.7) explains the implementation of the TERROIR model. The last section (§3.8) discusses the advantages and limits of the model. Model implementation compares two ‘real’ villages located in central Senegal that correspond to an “extensive” and an “intensive” system, exhibit contrasted landscape structures, crop rotations, and livestock and manure management practices. In this paper, particular attention is paid to how the information generated at the different organizational levels in the model effectively represents N flows within the system as a whole.

3.6 Description of the model

The conceptual model is described according to the Overview Design concepts and Details protocol (ODD) (Grimm et al., 2013). It has been slightly adjusted to highlight the specificities of the model. Further details and the full descriptions of the sub-models are provided in §3.10.

3.6.1 Overview

3.6.1.1 Purpose

The TERROIR model represents the management of a typical West African agro-sylvo-pastoral landscape in space and over time. It focuses on the processes that create biomass flows that are converted into N, which is then used to assess soil fertility management.

The purpose of the model is to provide realistic estimations of the structure of N flows at different levels: land plot and herd, household and village. It is not intended to predict long term agro-ecosystem dynamics but

rather to compare different agro-ecosystems, depending on input parameters concerning the structure of the landscape (proportion of land units, §3.6.1.2.1) and crop-livestock systems diversity (linked to a typology of households, §3.6.1.2.2).

Two systems are analyzed: the whole village, and the households that make up the village. Use of the household level as the main determinant for decision-making enables simulation of heterogeneous behaviors and emerging patterns at the village level.

3.6.1.2 Entities and organizational levels

In agro-sylvo-pastoral landscapes, the main acting and interacting entities are households and herds of livestock. They interact with land plots, the smallest spatial entity in the model (used for either agricultural or housing purposes; not to be confused with land units, which are land plot categories). **Households**, **livestock herds** and **land plots** are represented as agents in the model, as are **biomass stocks** (food, feed and fuel). Stocks are considered as passive agents as they are operated by the households who own them; stocks do not make decisions but can be subject to internal biophysical processes (e.g. N losses). They are shown with their main attributes in Figure 17, in the UML class diagram — Unified Modeling Language, see [Bommel and Müller \(2007\)](#) for more information on UML.

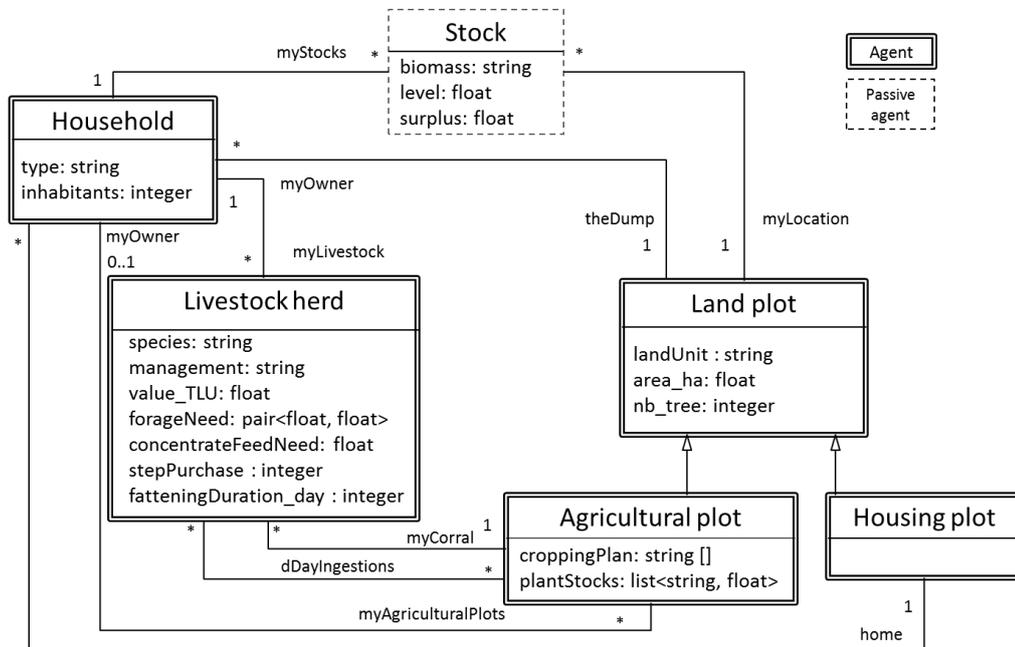


Figure 17. Class diagram of the TERROIR model and its agent parameters

Three levels of organization are represented in the model, as shown in Figure 18:

- i) the lower level includes the livestock herds, biomass stocks and land plots;
- ii) the intermediate level includes **households**, which make tactical and/or operational decisions that impact agents on the lower level ([Cerf and Sébillotte, 1997](#); [Fountas et al., 2006](#)) and **land units**, which enables to group plots according to their land unit attributes;
- iii) the upper level, which corresponds to the **village** and where main emerging phenomena resulting from dynamic interactions between lower level entities (e.g. households) are observed.

Entities are static in space (immobile), except livestock herds that have the ability to move between land plots depending on their management (determined by the households). Livestock mobility, place of ingestion, place of excretion and possible competition for local resources play a major role in the determinism of flows between land plots and hence, land units. Conversely, biomass flows generated by household actions do not require the spatialization of the household itself to occur (e.g. such as moving manure from housing areas to be spread on home fields).

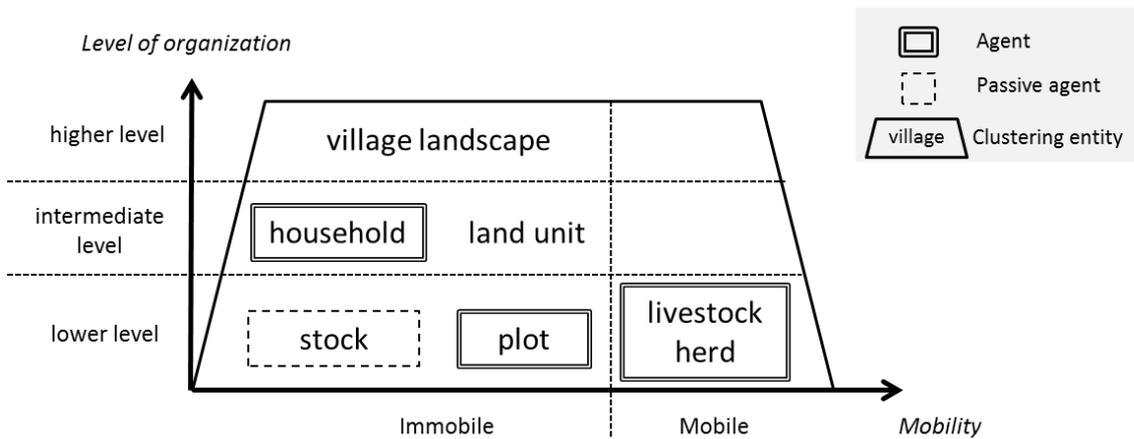


Figure 18. The six entities of the model, sorted according to their organizational level and their mobility

3.6.1.2.1 Land plot

Like the landscape in West Africa, the modelled village landscape is divided into four land units (moving from the center to the periphery: housing area, home fields, bush fields and rangelands) (see Introduction). The total village area and landscape structure (defined in the model as the proportion of each land unit within the village) are input parameters set by the user.

The model represents space as a 2D grid of square cells to account for the village landscape. Each cell (i.e. one land plot) has a fixed area of 0.25 hectares, which is used as the smallest area managed by households. For instance, it corresponds to the average size of the corrals used for night-time livestock enclosure (Achard and Banoïn, 2003). At initialization, the land unit of each land plot is set according to its distance to the center of the village and the required proportion of each land unit in the village.

Land plots are grouped in two sub-classes: `housingPlot` and `agriculturalPlot` (Figure 17). Housing plots are plots in which the households live; agricultural plots include any plot that can be covered by vegetation other than trees, where most of the farming activities take place and livestock herds can wander freely. Agricultural plots belong to either the home fields, bush fields or rangelands land units. They can either be private assets managed by a household or a common resource of the village that can be used by all households (e.g. land plots in the rangelands).

Each land plot can hold trees, which are not represented as individuals but as groups depending on whether they were pruned or not in the current year. In addition to tree products (leaves and wood), two types of biomass are produced and stored on agricultural plots: natural vegetation (dominated by grass) or crops (cereals, legumes). The type of biomass produced depends on the use of the plot, which is based on the plot cropping plan. Cropping plans determine land use rotation (e.g. cereal, legume, fallow) on the plot over the years. The plans are decided on by the plot owner (i.e. a household agent) and can be adjusted to produce larger or smaller quantities of cereals, depending on the household's needs of staple food. Plots with no owner have a fixed land use: they grow natural vegetation.

3.6.1.2.2 Household

Households are the key agents in the model. A household is defined as a group of people who eat together (nuclear and/or extended family). Each household is located on a housing plot, which determines its home location.

Each household belongs to a type that influences its initial parameters and decision scheme. The typology is based on the one built by Balandier (2017) in central Senegal based on household resource endowment and crop and livestock management practices (cf. §2.4.3). Similar typologies have been developed in Burkina Faso (Vall et al., 2006). All households have crop and livestock activities, but the intensity of the cropping or livestock practices varies according to the type of household (cf. §3.10.3.1). There are four types of households: crop-subsistence households (CS), livestock-subsistence household (LS), crop-market (CM) and livestock-market (LM) oriented households.

Subsistence-oriented households (CS and LS), are low resource-endowment households that mainly aim to provide food for their family, in contrast to market-oriented households that aim to produce surpluses for agricultural markets (CM and LM) (Table 3). Regarding livestock management, subsistence-oriented households mainly practice free-grazing on wide areas and their feeding system is based on local forage resources; in contrast market-oriented households mainly practice in-barn fattening and import feed concentrate. Subsistence-oriented households also use fewer inputs per hectare for their crops than market-oriented households and practice triennial rotations that include fallow. Based on this first distinction, crop-oriented households contrast with livestock-oriented households, depending on the main activity on which they rely.

A household's need for both food and fuel (wood and dung) depend on the number of members of the household (set fixed during a simulation and filled in weekly).

Table 3. Typical input parameters for the structure of the 4 types of households represented in the model based on data surveys in the study area (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2016)

Input parameter	Unit	Subsistence		Market	
		crop (CS)	livestock (LS)	crop (CM)	livestock (LM)
Resource endowment					
Home fields (ha)	Ha	2	1	2.25	1.5
Bush fields (ha)	Ha	3.5	5	3.5	3.75
Inhabitants	Unit	10.1	9.1	15.0	19.1
Ruminants	TLU ⁽¹⁾	3.5	15.1	7.2	12.4
Animal traction	Unit	1.2	1.2	1.9	1.6
Mineral fertilizer available (for millet)	kgDM/year	75	25	200	275
Mineral fertilizer available (for groundnuts)	kgDM/year	50	0	200	275
Practice					
Home field rotation	Year 1 (Y1)	millet	Millet	millet	millet
	Year 2	millet	Millet	millet	millet
Bush field rotation	Year 1	fallow	fallow	millet	millet
	Year 2	groundnut	Groundnut	groundnut	groundnut
	Year 3	millet	Millet	Back to Y1	Back to Y1
Free-grazing livestock system	% total ruminant	80	100	50	40
Staple crop (cereal) targeted	% TCA ⁽²⁾	67	65	60	65
Crop residues left on field	% production	25	40	1	1

⁽¹⁾ Tropical Livestock Unit (TLU): 1TLU = 1 animal of 250 live weight; ⁽²⁾ TCA: total cultivated area

3.6.1.2.3 Livestock herd

Livestock is not modeled as individual animals but as a herd together with its herder. A herd is defined as a herder taking care of a group of animals of the same species that belong to the same owner (i.e. a household) and share the same type of management. The number of animals in a herd is measured in *Tropical Livestock Units (TLU)* used as a common unit. A TLU is equivalent to an animal of 250 kg live weight (1 adult zebu male = 1 TLU). Three livestock species are differentiated: bovine, small ruminant and equine. There are also three types of livestock systems in the model: free-grazing ruminants, in-barn ruminants, draft animals. Livestock herd agents are located on a land plot. Livestock managed in free-grazing system have the ability to move across the

landscape and be located on a plot grouped in any land unit. On the contrary, fattened and draft animals are kept in-barn on the land plot which is the owner's home, i.e. only on a plot grouped in homestead areas.

Free grazing is an extensive livestock system in which livestock herds are used to fertilize agricultural plots with excreta produced while grazing, and are kept in corrals at night. **In-barn** is an intensive livestock system that targets external markets. In the model, the in-barn system aims at fattening the animals for a fixed time period until they are sold. In-barn livestock herds are kept on the same housing plot as the household owner's home, which they only leave when they are sold. In-barn herds are fed with forage and feed concentrate purchased on the external market. Animal feed requirements are higher in the in-barn system than in the free-grazing system. **Draft livestock systems** involve horses, in contrast to the two other systems that involve bovine and small ruminant herds. The management of herds of draft horses is similar to in-barn herds in terms of location and feed requirements. The objective is to maintain the animals in good condition for daily technical operations (carrying loads, especially manure, plowing, etc.).

Livestock herd variables are mainly related to feed consumption. All livestock agents have forage and feed concentrate requirements that vary depending on the livestock system and species concerned. Forage needs are divided into two types: need for low quality forage (cereal straw) versus need for high quality forage (legume hay, fresh weeds).

3.6.1.2.4 Household stocks

Stocks are located on a land plot depending on the type of biomass they store (e.g. at home in the granary for cereal cobs and on the closest agricultural plot for straw). There are two kinds of stocks: **stocks for home consumption**, i.e. food for the households (dry cereals and legumes), fuel for cooking (wood) and forage for livestock herds; and **fertilizer heaps that store the manure** (a mixture of excreta and refused animal feed) produced by the livestock herds located on housing plots (i.e. in-barn or draft livestock herds). Kitchen waste is not stored but directly spread on the fields located closest to home. Each household agent owns one stock per type of storable biomass.

Each stock is considered to be of unlimited capacity and includes the stock for daily use, which changes depending on the household's consumption; and surplus stock, which can theoretically be sold without causing any shortage for the household (cf. §3.6.2.3).

3.6.1.3 Process overview and scheduling

The general sequence of actions in the model simulates one year in an agro-sylvo-pastoral landscape (Figure 19). The beginning of the simulated year is based on the cropping season calendar: it begins the month of the first significant rainfall event and ends one year later. The model proceeds in daily steps; however some processes are abstracted on a weekly basis (i.e. updated every 7 time steps) and others on an annual basis (as a year is 12 months counting 30 days, these processes are updated every 360 time steps).

Only processes relating to livestock feeding and induced excretions take place on a daily basis. Indeed, in the model livestock herds on free-grazing system interact and compete with each other through their environment while grazing. The daily time step allows reducing the bias possibly induced by the herds asynchronous biomass consumption. Most of the other processes are abstracted as weekly processes, as suggested by field investigations. For instance for cropping activities, it actually takes one week to harvest one hectare of dry cereal (e.g. millet) on average; for livestock management, livestock are traded once a week in the market and corral choice is made at least for a week (also described in Achard and Banouin (2003)). If the actual household food consumption is different among households each day, it is quite homogeneous on average when considered over a week. Using the week scale thus avoids the accumulation of uncertainties induced by the difficulty to model the daily heterogeneity accurately. Similarly, plot processes are modelled on a weekly basis. Mineral fertilization is the only cropping activity on an annual scale. Indeed, no fertilizer loss over time is introduced in the model (only a loss at application) and there is not any impact of the exact date of fertilization on nutrient availability. Activities relating to tactical decisions, such as land use changes (crop rotation in agricultural plots), are undertaken every year. Cash crop sales are assumed to happen yearly, after harvest when the stocks reach their maximum level as actual markets are not represented as to influence households' decisions.

Before using the model for simulations, we set the end year for our simulation, which is characterized by the convergence of simulation outputs. To this end, we ran simulations over 30 years, under the hypothesis of no change in population or in the landscape. We observed that convergence was reached after only 5 years. In addition, the model is stochastic (cf. §3.6.2.2), so, we needed several replications for each parameter's tuple values. We explored different values of the number of replications and observed that simulations had to be repeated 8 times to overcome model stochasticity, i.e. to stabilize the variability within simulation outputs of the 5th year. Thus, in the model implementation and evaluation, we simulated the model over 5 years and ran 8 replications for each set of parameter values. Only the 5th year of each replication was retained and global simulation results are the average of the values for the 5th year of the 8 replications.

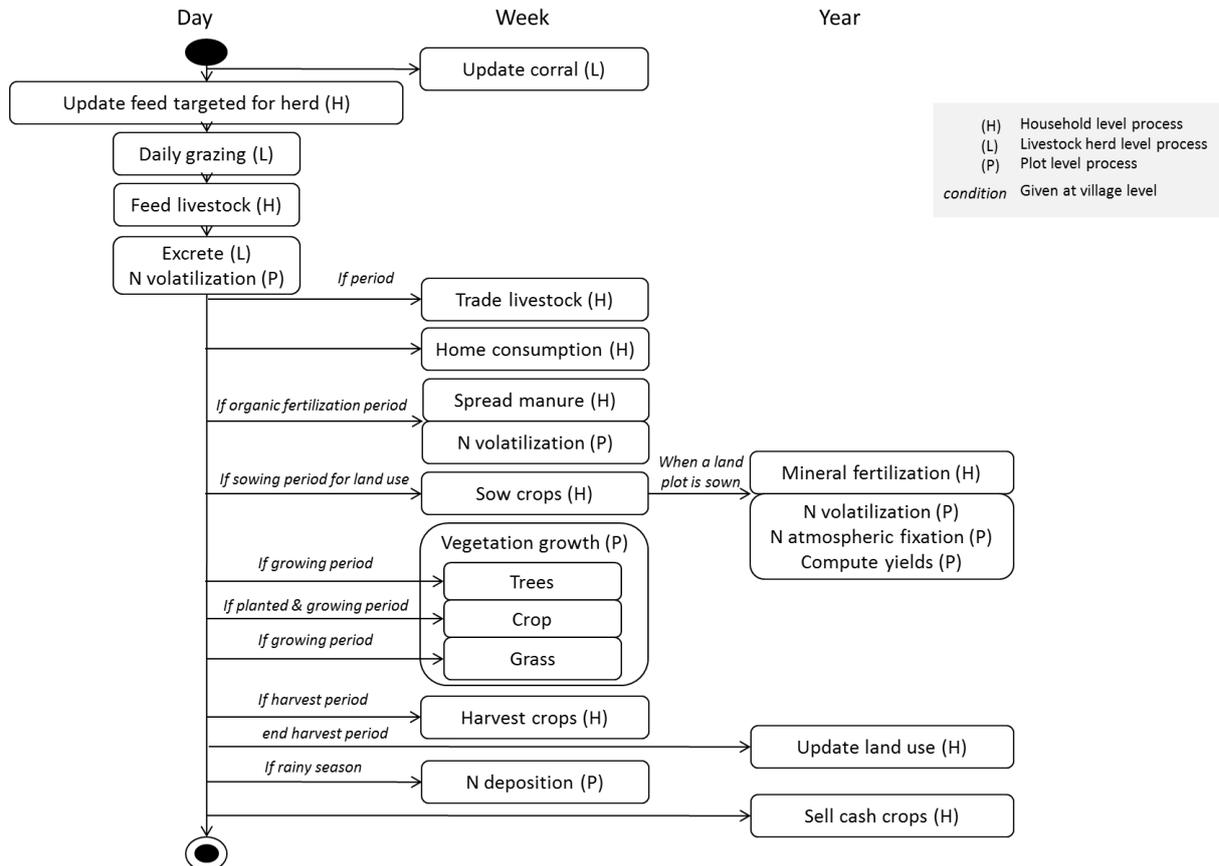


Figure 19. General sequence of actions sorted according to the time scale on which they are performed in the TERROIR model: daily, weekly or annually

3.6.2 Design concepts

3.6.2.1 Basic principles

3.6.2.1.1 Household actions

In the model, daily household actions are performed based on the local interactions between the agents represented in the model (households, livestock herds) and their environment, following (Guerrin, 2009; Vayssières et al., 2007). The household decision process is represented as a decision tree with if-then-else conditions. An example is the use of stored food products: if stocks are emptied, households proceed with imports (cf. §3.6.2.5). If the cropping season has not been good enough (insufficient rainfall) to fulfill household food needs, the stocks will be used up faster than in better farming years and this will lead to more imports. Similarly for livestock, a bad cropping season produces fewer crop residues and consequently leads to greater use of natural resources, such as tree forage to meet feed needs.

Actions within the systems create a network of interactions in the form of biomass flows (in kg of dry matter), occurring over time and in space between the system compartments. In the context of West African agro-sylvo-pastoral systems, we designed two conceptual stock-flow models to synthesize the simulated flows (cf. §1.4.2).

The **first** model focuses on interactions among the **farming activities** of the households that make up the village (Figure 4). Its compartments are **soil-plant**, **livestock herd**, **human** (group of individuals living in a household), **granary** (food, forage and fuel stocks) and **heap** (manure stock). The human and granary related activities are included in the farm activities as home consumption is high in the systems studied here. The same conceptual representation has already been used to analyze crop-livestock interactions in similar systems (Alvarez et al., 2014; Rufino et al., 2006; Stark et al., 2016). The **second** model focuses on flows circulating between the **land units** (Figure 5). The model compartments are **housing areas**, **home fields**, **bush fields**, **rangelands**. This spatial representation of system flows is used to analyze the spatial heterogeneity and gradients of soil fertility observed in similar systems (see Introduction).

Characterization of each biomass flow enables the two models to be intertwined; each biomass flow has (i) a farming activity of origin and one of destination (Figure 4) and, (ii) a land unit of origin and one of destination (Figure 5). For instance, during manure spreading, there is a flow of manure from the heap to the soil-plant compartment and from the housing area (where the heap is located) to home fields (or bush fields, depending on the location of the plot).

3.6.2.1.2 Biophysical sub-models

In the model, biophysical processes are simple empirical sub-models. Crop and grass yields are computed annually, based on annual rainfall (in mm/year) and the quantity of N available (i.e. mineralized N). The model uses a water-limited yield curve and a fertilization coefficient based on available N (cf. §3.10.4.1.3). The equation was determined with a mechanistic model, CELSIUS (Cereal and Legume crops Simulator Under changing Sahelian environment) (Affholder et al., 2012; Ricome et al., 2017). The quantity of available N depends on the quantity of mineral fertilizer and organic matter applied to the crops for the last three years. Not all the organic N applied is available right away, as part of N availability comes from a so-called “residual effect” of organic fertilization, due to the delayed process of organic N mineralization (Freschet et al., 2008). As crop and grass models are not dynamic, there is no impact of the exact date of the nutrient availability on yield computation. Consequently, mineral fertilization, mineralization and losses are calculated annually. Weeds grow along with crops but do not impact the crop yields and are used green to feed in-barn livestock. Weed yield is based on the average weed biomass measured in cultivated fields by Achard and Banoïn (2003) in Niger.

Each day, livestock herds ingest (forage, feed concentrate) and excrete (dung and urine). The ingested quantity is limited by the ingestion capacity of the herd, which depends on the number of animals and species in the herd and the digestibility of the forage and feed concentrate (cf. §3.10.4.2). Fattening livestock ingest more biomass than free-grazing livestock, in terms of quantity of dry matter, as these animals are fed with concentrates, which are more digestible.

The feed intake changes over the course of the year, depending on the type of resource and period of availability, e.g. immediately after harvest, free-grazing livestock ingest more crop residues; during the wet season, fresh grass are distributed to in-barn livestock instead of hay, etc. (Chirat et al., 2014). Quantities also vary. Households increase the quantity of highly digestible forage (hay) and feed concentrate given to livestock a few weeks before they are sold, to produce fatter animals. Draft animals require more forage when they are working (spreading manure, sowing, harvesting). The quantity of N excreted as urine depends on the excretion of dung, which, in turn, depends on the quantity of N ingested the previous day (cf. 3.10.4.2.2). Excreta deposits are proportional to the time spent by the animals on the plot. For instance, free-grazing herds spend a given time in their corral at night (by default, in the model, the herd stays on the plot for 10 hours, leading to the deposition in the corral of 10/24ths of the herd’s daily excreta).

3.6.2.2 Stochasticity

Stochasticity is mainly introduced at simulation initialization when land plots are attributed to households and land use is determined (one of the possible crop rotations, according to the type of household and plot land unit, §3.6.1.2.2). At the end of each cropping season, households update land use in their land plots according to the crop rotation of each. Then, in order to maintain a predetermined proportion of land plots with cereals to guarantee food security, households replace a non-cereal land use (fallow, legume) by cereals.

3.6.2.3 Predictions

Households estimate their annual needs for each type of stored biomass and then determine the surpluses of each they might have (cf. 3.10.3.4). For instance, at the end of the cropping season and after adjusting their cropping plan (cf. §3.6.2.2), households can determine the quantity of seeds to save for the upcoming cropping season.

3.6.2.4 Sensing

In West Africa, some activities are decided collectively; e.g. beginning of cereal sowing, when transhumant livestock can arrive in the village and should leave it (Audouin et al., 2015; Dongmo et al., 2010). In the model, information at the village level is fixed by the modeler (e.g. introducing rules such as “sowing starts one month before the first rain”). All information is public, which is quite realistic as the modeled system is relatively small (village). Hence, household agents are assumed to know the availability of all products in their village, i.e. the amount of any surplus of all stocks. Household decisions are made based on what they know from their own livestock and agricultural plots. For instance, the previous yields of their agricultural plots enable them to calculate which plots require more or less fertilizer. In the model, livestock herds in free-grazing systems include a herder; the herder evaluates biomass availability on agricultural plots and leads the herd around the village land. In this way, free-grazing livestock herds are modelled as cognitive agents, which are independent from their household for grazing and corralling activities.

3.6.2.5 Interactions

Households interact with the entities they manage: cropping activities have a direct impact on agricultural plot production, livestock feeding influences the quantity of excreta produced by the herd, stocking and destocking biomass influences the levels of stocks. With the exception of a few interactions, such as changing the land use of a plot, most interactions result in biomass and N flows. When a household needs a product that is out of stock, it imports it from other households, if possible, within the village. If a product is not available in the village (e.g. fish, feed concentrate) or is sold out, households buy it on the external market. As long as a product is available in the village (i.e. as a surplus) households will get it from another household. We use the term “purchase” when dealing with the external market and “exchange” when dealing with interactions between households (including both monetary and non-monetary transactions). Imports are assumed to be unlimited (i.e. market prices and availabilities are not taken into account), and any household agent is likely to interact with any other household agent as they all belong to the same village social network. Households will prioritize exchanges with those with the highest stock surpluses. Households also interact with each other through livestock. Independently, in a free-grazing management framework, herds interact with the plot in which they graze by taking up plant biomass and fertilizing it with their excreta. Herds may graze and excrete on plots owned by different owners, thus generating interactions between the household system and the plot system.

3.6.2.6 Observation

The model computes animal and plant production as a result of biological processes impacted by respectively animal feeding and soil fertilization, which both result from the actions of households and livestock herds. Yields can be observed at the plot, household, land unit or village landscape levels. Herd demography and stock levels are monitored at the lower level of organization, i.e. at herd and stock level respectively. The main observations, i.e. simulation outputs, are the biomass flows created by household and livestock actions and by the biophysical processes. These biomass flows are converted into N flows (in kgN per month): (i) ‘actionable’ flows stem from human actions, e.g. harvesting crops, feeding animals, spreading manure; they can be assessed by questionnaires filled in by the households; (ii) ‘biophysical’ flows are mainly determined by natural causes, e.g. N atmospheric deposition, fixation by legumes, leaching, run-off and gaseous emissions; they cannot be quantified by questionnaires and must be measured in the field or calculated based on coefficients in the literature.

Biomass flows are represented at household and village landscape levels. The major difference between the two levels concerns interactions between households: biomass flows between two households are considered

as external flows for both households, while at village landscape level they are considered as internal. Spatially, rangelands are not included at the household level while at the village landscape level the whole village area is taken into account, and consequently includes rangelands, which are common-pool resources.

In this paper, in order to fit model simulation outputs with available field data (based on the questionnaires), only actionable flows are used to calculate system assessment indicators (Rufino et al., 2009b; Stark et al., 2016). We calculate

- (i) partial N balance (= input N – output N) to assess soil fertility maintenance (Schlecht and Hiernaux, 2004), as opposed to full N balance that includes biophysical flows;
- (ii) N throughput (= sum of circulating N flows in the system) to assess the level of intensification of the system;
- (iii) N recycling efficiency (= output N/input N) to identify bottlenecks in the N cycle (Rufino et al., 2006).

3.7 Model implementation

In this section we assess the usefulness of the model to simulate and compare two contrasted agro-sylvo-pastoral landscapes.

3.7.1 Simulating two contrasted villages

Two villages located in the Senegalese groundnut basin (in central Senegal) were surveyed extensively in 2013 by Audouin (2014) and Odru (2013). Audouin et al. (2015) showed that the two villages are contrasted. The first village (Vext) was described as an “extensive” system with the dominance of subsistence-oriented households, based on free-grazing livestock. The second village (Vint) was described as an “intensive” system with the dominance of market-oriented households, with in-barn livestock fattening. The two village landscape structures are very different: in Vext, rangelands facilitate livestock mobility within the village, while in Vint there are no rangelands (Figure 20). In addition, Vext fallows are collectively organized in order to isolate free-grazing livestock in the village during the cropping season, while in Vint, most of croplands are cultivated.

Simulations were run for the two villages using the model input parameters listed in Table 4. Landscape structures were based on the real land unit proportions observed in the two villages. The corresponding grids were built by the model concentrically around the central cell (cf. §3.6.1.2.1) (Figure 20).

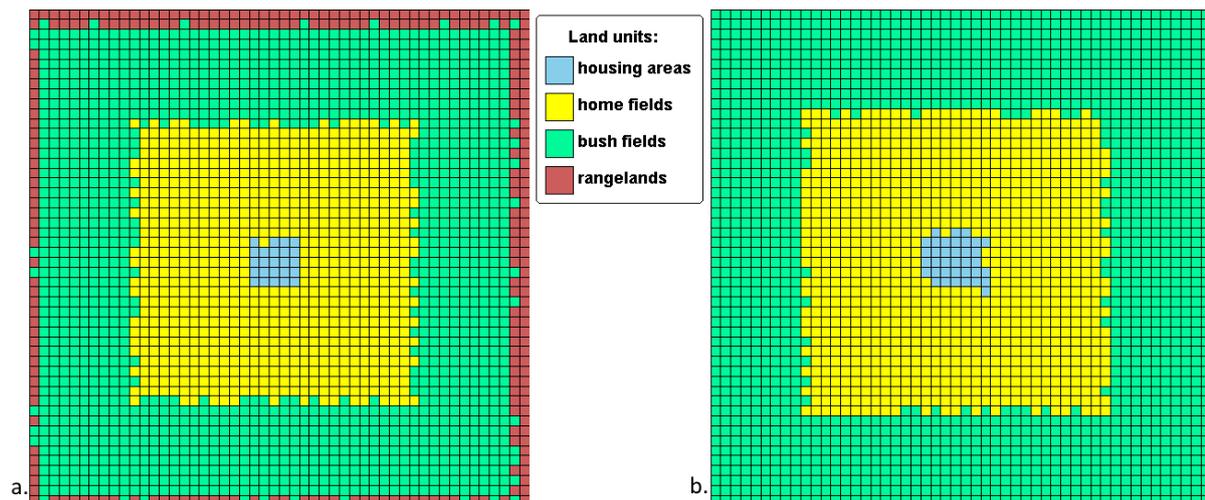


Figure 20. Example of spatial grids generated by the model: two village landscape representations characterized by different structures

- a. Village dominated by cultivated areas but where rangelands still exists in the landscape (Vext).
- b. Village where the total agricultural area is cultivated, there are no rangelands, and a larger proportion of home fields (Vint) compared to the other village.

Table 4. Input parameters of the two simulated villages (Vext, Vint)

Input parameters ⁽¹⁾	Unit	Vext	Vint
Households types			
Number of households	household units	84	70
Crop-subsistence oriented households (CS)	% total households	90	75
Livestock-subsistence oriented households (LS)	% total households	10	0
Crop-market oriented households (CM)	% total households	0	20
Livestock-market oriented households (LM)	% total households	0	5
Landscape structure and rainfall			
Village area	Hectares	376	376
Housing area	% village area	1	1
Home fields	% village area	10	45
Bush fields	% village area	74	54
Rangelands	% village area	14	0
Annual rainfall	mm/year	680	680

⁽¹⁾ Based on field data collected for the year 2013, (Audouin, 2014; Odru, 2013)

⁽²⁾ 1 Tropical Livestock Unit (TLU) = 1 animal-equivalent of 250 kg live weight

3.7.2 Simulation results

This section compares simulation results (Sim) for Vext and Vint. Field data (FD) are listed in Table 5 but are only used in §5.2.2 for model evaluation. The first sub-section mainly refers to the first conceptual stock-flow model: interactions between farming activities (Figure 4), while the second sub-section compares spatial heterogeneity within villages resulting from N spatial transfers, with reference to the second conceptual model: interactions between land units (Figure 5).

3.7.2.1 Interactions between activities

At compartment level, the soil-plant compartment is the only compartment in deficit (i.e. with a negative N balance) in both villages, while the others tend to accumulate N (Table 5). In Vint, livestock produce more excreta than in Vext (+8.9 kgN/ha). Accumulation is particularly high in the heap compartment in Vint (+10.2 kgN/ha more than in Vext). Variability at compartment level is higher in Vint than in Vext, due to the diversity of household types (only subsistence-oriented households in Vext while both subsistence and market-oriented households coexist in Vint).

At household level, N balances are on average twice higher in Vint than in Vext, whereas efficiencies are on average 1.5 times lower in Vint than in Vext (Table 5). Pairwise comparisons using the Z-test revealed significant differences between households in Vext and Vint for balances ($p = 0.0092$) and efficiencies ($p = 0.018$). However, variability was high among the households in each village; standard deviations ranged from 1.0 to 3.3 times the mean values. This reveals major disparities among households. For instance, in Vext, the N balance was on average 6 times higher in livestock-subsistence-oriented (LS) households than in crop-subsistence-oriented (CS) households. As LS have more free-grazing livestock than CS, they benefit from N transfers driven by their own livestock from fields owned by CS (where their livestock can graze during the day) to their own fields (where their livestock excretes during night corralling). In Vint, livestock-market-oriented (LM) households have N balances about 15 and 5 times higher than CS and crop-market-oriented (CM) households, respectively.

Table 5. N partial balances and N recycling efficiencies in 2013 based on field (FD) and simulation (Sim) data
Example of an extensive village (Vext) and an intensive village (Vint) at village, household and compartment levels

Organizational level	Vext		Vint	
	N partial balance (kgN/ha/year)*	N recycling efficiency (Dmnl)	N partial balance (kgN/ha/year)*	N recycling efficiency (Dmnl)

	FD	Sim	FD	Sim	FD	Sim	FD	Sim
Higher level: village								
Village	4.0	7.3	0.6	0.4	25.4	22.0	0.3	0.3
Intermediate level: households**								
All households	14.6±33.2	14.2±15.2	0.9 ±1.0	0.5 ±0.1	37.6±47.9	23.4±31.6	0.5 ±0.5	0.4±0.1
CS***	NA	9.1 ±1.1	NA	0.4 ±0.1	NA	10.6 ±1.6	NA	0.4±0.1
LS***	NA	59.7±2.8	NA	0.3± 0.0	-	-	-	-
CM***	-	-	-	-	NA	53.4±50.3	NA	0.4±0.0
LM***	-	-	-	-	NA	156.2±1.1	NA	0.3±0.0
Lower level: compartments**								
Human	9.2 ± 8.4	7.7 ± 0.4	0.5 ±0.3	0.5 ±0.0	12.6 ± 6.7	8.9 ± 2.8	0.2 ± 0.2	0.4±0.0
Livestock herd	3.3 ± 1.8	3.5 ± 1.8	0.7 ±0.2	0.2 ±0.1	2.1 ± 12.4	0.2 ± 6.5	1.0 ± 0.2	1.1±0.1
Heap (manure)	5.8 ± 6.9	6.5 ± 0.8	0.6 ±0.6	0.3 ±0.0	20.1±27.6	16.7±24.0	0.7 ± 1.9	0.2±0.1
Soil-plant	-5.1±19.0	-14.3±7.0	3.4 ±3.2	1.8 ±0.3	-9.8 ±24.2	-13.5 ±1.7	1.5 ± 1.1	1.6±0.1
Granary	-1.8 ±19.4	10.9 ±0.7	1.2 ±0.9	0.6 ±0.0	15.0±41.1	11.1 ± 1.4	0.8 ± 0.9	0.6±0.1

FD = field data; Sim = simulations; Dmnl = dimensionless; NA = not available; - = do not exist

* at village level, per hectare of the village area; at household level, per hectare of the household cultivated area

** mean ± standard deviation for the household population in each village; n=84 households for Vext and n=70 households for Vint.

*** Household types: CS = crop-subsistence; LS = livestock-subsistence; CM = crop-market; LM = livestock-market

At village landscape level, the same differences as at household level were simulated between Vext and Vint for N balances and N efficiency (Table 5). More flows circulate in Vint than in Vext; throughput reaches 126.0 kgN/ha in Vint versus 95.3 kgN/ha in Vext. Flow intensification in Vint corresponds to an increase in both plant and animal production and explains why more people and animals can live in Vint; human population density is about 5.5 times higher and livestock stocking rate about 2 times higher in Vint than in Vext (Table 6). In both villages, the main N imports are feed concentrates, which account for 59% and 66% of total imports in Vext and Vint, respectively; the main N exports are groundnuts, which account for 88% and 53% of total exports in Vext and Vint, respectively. Livestock exports are high in Vint, they account for 46% of total N exports, but for only 3% in Vext. In total, Vint imports +19.9 kgN/ha more than Vext; particularly +4.0 kgN/ha of feed concentrates and +2.5 kgN/ha of mineral fertilizers; Vint also exports +5.2 kgN/ha more than Vext.

**Table 6. Structure parameters observed in the field (FD) and simulated by the model (Sim)
Example of an extensive village (Vext) and an intensive village (Vint)**

Calculated parameters	Unit	Vext		Vint	
		FD	Sim	FD	Sim
Number of inhabitants	inhabitants/ha of village area	0.6	0.5	3.0	3.2
Herd stocking rate	TLU ⁽²⁾ /ha of cultivated area	0.95	0.88	1.69	1.69
Free-grazing ruminants/total ruminants	Dimensionless	1.0	1.0	0.66	0.67
Fattening ruminants/ total ruminants	dimensionless	0.0	0.0	0.34	0.33
Cereal yields (all fields)	kg dry matter/ha	896	1039	953	1041

Cereal yields (home fields only)	kg dry matter/ha	1 168	1 114	1 126	1 190
Cereal yields (bush fields only)	kg dry matter/ha	640	947	790	902

3.7.2.2 Spatial heterogeneity

Soil-plant compartments tend to have an N deficit (see negative N balances in [Table 5](#)); however, strong spatial heterogeneity of the plot level N balance is found in both villages. Home fields have on average positive balances, in contrast to bush fields and rangelands ([Table 7](#)); they receive 4 and 6 times more organic and mineral fertilizer than bush fields in Vext and Vint, respectively. In Vext, cereal yields are 15% higher in home fields than in bush fields; similarly, in Vint, yields are 24% higher in home fields than in bush fields ([Table 6](#)). Results highlight high N balances in housing areas ([Table 7](#)). Housing areas accumulate N mainly in the form of manure (see positive balance of manure heaps in [Table 5](#) and N in housing areas in [Table 7](#)).

At landscape and household levels, there is a decreasing gradient of N balances from the core land units (housing areas and home fields) to peripheral land units (bush fields and rangelands) (see [Table 7](#)). However, in terms of efficiency, the reverse is true, as the land units that receive less N (rangelands and bush fields) produce more per kg of N input ([Table 7](#)). Livestock-driven flows are high in both villages, as livestock intake and excreta represent 52% and 49% of the total circulating N flows in Vext and Vint, respectively. Livestock excreta account for 63% (i.e. 11.9 kgN/ha/year) and 43% (i.e. 10.6 kgN/ha/year) of the N inputs to the soil-plant compartment in Vext and Vint, respectively. Household manure accounts for on average only $8\% \pm 2$ and $9\% \pm 1$ of the cropland area in Vext and Vint, respectively. Within the land units, heterogeneity is higher in home fields than in bush fields in Vext (see spatial distribution plot-level N balances in [Annexe 2](#)). As generally observed in the study area ([Audouin et al., 2015](#)) fields are fertilized once every two to three years, due to limited access to organic inputs. As soil storage is not taken into account in the calculation of N balance, the balance is high in the year fertilizer is applied and low the following years. In Vint, heterogeneity is lower in housing areas and home fields than in Vext because there are more market-oriented households that can import more mineral fertilizers to fertilize plots when they are not fertilized with manure.

Table 7. Simulated N partial balances and N recycling efficiencies in 2013 for an extensive village (Vext) and an intensive village (Vint) at village, household and compartment levels

Organizational level	Vext		Vint	
	N partial balance (kgN/ha/year)*	N recycling efficiency (Dmnl)	N partial balance (kgN/ha/year)*	N recycling efficiency (Dmnl)
Higher level: whole village landscape				
Housing areas	1888.2	0.4	2128.2	0.3
Home fields	13.1	0.7	16.3	0.7
Bush fields	-21.4	2.8	-23.0	3.5
Rangelands	-23.1	3.6	-14.3	3.3
Medium level: individual households**				
Housing areas	1137.6 ± 30.9	0.5 ± 0.0	1756.4 ± 341.4	0.5 ± 0.1
Home fields	19.4 ± 41.6	0.9 ± 0.2	26.3 ± 2.8	1.1 ± 0.2
Bush fields	-21.8 ± 2.8	3.0 ± 1.2	-24.3 ± 2.2	5.2 ± 4.8

* at village level, per hectare of the land unit within the village; at household level, per hectare of the land unit within the household

** mean ± standard deviation for the household population in each village; n=84 households in Vext and n=70 in Vint.

3.8 Discussion

3.8.1 Model evaluation

Model evaluation is essential but not straightforward, particularly when models seek to represent complex systems in which decision making and biophysical processes interact (Bousquet and Le Page, 2004). This section aims to evaluate model performances by comparing simulation results for the two villages with field data from the same two villages (Audouin et al., 2015; Balandier, 2017) for N partial balances and efficiencies at the three levels of organization (Table 5). To our knowledge, such model evaluation, combining several levels of organization, is new in West Africa. Field data were gathered retrospectively for year 2013, for all biomass and N flows between farming activities. It was an extensive task that was not extended to flows between land units due to the high degree of detail required by flow spatialization. Consequently, spatial N transfers were compared to measures taken in similar contexts and available in the literature. Error indicators are calculated according to Bennett et al. (2013) formulas (bias = field data – simulation outputs; relative bias = bias/field data).

3.8.1.1 Interactions between activities

Biases in N balance are directly impacted by biases in inflows and outflows. For instance, at compartment level, in Vext, simulations underestimate granary imports by -2.0 kgN/ha and exports by -12.9 kgN/ha. This underestimation results in an accumulation in the granary in simulations (+10.9 kgN/ha), whereas field data showed that households destock their surplus from the previous year (-1.8 kgN/ha). Analysis of inflows and outflows showed that the model underestimates most of the compartment flows, except for soil-plant and livestock compartments in Vext and for outflows of the human compartment in Vint (data not shown). The mean relative bias between survey data and simulation results was 23% and 28% for compartment inflows and 33% and 48% for compartment outflows in Vext and Vint, respectively. Mean absolute bias is rarely given for models representing complex socio-agro-ecosystems but similar figures (generally between 20% and 40%) are given in other studies on nutrient flows under tropical conditions (see for instance Vayssières et al. (2009b)). In Vint, where most of the households are market-oriented, imports from the external market are underestimated in all compartments compared to the field data, resulting in an underestimated N balance at household and landscape levels (Table 5). In Vext, while the bias for N balance is only -0.4 kgN/ha at household level, the model overestimates the balance at village level by +3.3 kgN/ha.

Simulations highlight an accumulation of N in the heap compartment, which was also observed in the field data and was described in Mali by Blanchard et al. (2013). Despite the use of an artificial threshold to limit manure spreading, the model satisfactorily reproduces the reality of an insufficient workforce and resources for

manure transport observed in Vint by [Audouin et al. \(2015\)](#). Manure is spread on less than 10% of the cropland area in simulations (cf. §3.7.2.1), which is close to the 3% to 8% coverage estimated by [Hiernaux et al. \(1997\)](#) for villages with similar rainfall in Niger.

Balances in Vext show less variability than in Vint in both field and simulation data; however, variability was higher in field data than in simulation data. The model particularly underestimates the variability in the human and granary compartments ([Table 5](#)). In the model, interactions are not limited by socio-economic factors but by biomass availability; households with the highest surpluses destock towards households with a deficit until no household has a deficit or a surplus. The model does not take into account acquaintance networks or household decisions in the face of market prices that may actually affect biomass exchanges between households, consumption and storage practices. On this basis, a third conceptual model that deals with interactions between household agents ([Nowak et al., 2015](#)) can be used; however parameterizing such a model would require in-depth social surveys, which are not currently available for our case study.

3.8.1.2 Spatial heterogeneity

Most of the partial N balances calculated in West Africa are negative ([Schlecht and Hiernaux, 2004](#)), the same as in our simulations and field data. Soil-plant compartments have lower N balances of about -9 kgN/ha in simulations compared to field data; however simulation data are close to the -12 kgN/ha estimated by [Stoorvogel and Smaling \(1993\)](#) for Senegal as a whole.

The importance of livestock-driven flows was assessed by [Manlay et al. \(2004a\)](#) in “extensive” systems in southern Senegal. These systems are highly reliant on free-grazing livestock like in Vext. These authors calculated that livestock excreta account for 86% of the total N inputs in the soil-plant compartments. In addition, fewer external inputs are used in Vext and in southern Senegal than in Vint. Livestock excreta contribute more to the soil-plant compartment in southern Senegal than in Vext due to higher stocking rate (1.6 TLU/ha of cultivated area in southern Senegal compared to 0.88 in Vext and 1.69 in Vint). Compared to the village in southern Senegal, fewer livestock-driven N spatial transfers were simulated and observed on-field for Vint, where animals are in mainly kept in barns and where free grazing is limited.

Despite the use of simple empirical models (§3.6.2.1.2), similar patterns of higher yields in home fields compared to bush fields are observed in simulations (§3.7.2.2) and in in field data ([Table 6](#)), where yields are +45% and +30% higher in home fields than in bush fields in Vext and Vint, respectively. A low relative bias of less than 6% for home field yields is observed in both villages between field data and simulations, but reaches 48% in Vext and 14% in Vint for bush field yields. It results in less spatial heterogeneity in the simulations than that observed in field data. In the model, spatial heterogeneity is mainly determined by the size of the free-grazing herd, farmers’ access to mineral fertilizers and labor shortages (which limits the quantity of manure that can be spread in a week), which are fixed according to each household type.

In practice, there is more spatial heterogeneity than that simulated. This is explained by numerous biotic and abiotic factors not taken into consideration in the model such as:

- (i) soil heterogeneity: in West Africa most soils are sandy (as modelled) but some sandy soils have more clay than others ([Pieri, 1989](#));
- (ii) rainfall distribution: rain does not fall homogeneously in a village ([Akponikpè et al., 2011](#));
- (iii) weeds, pest and disease pressure affect crop production, resulting in variability in millet yields from one field to the other. Pressure is higher in bush fields than in home fields ([Audouin et al., 2015](#)), explaining the bigger differences between simulated and on-field yields in bush fields compared to home fields ([Table 6](#)).

More spatial variability could be introduced in the model by randomizing the values of these limiting parameters (e.g. rainfall, weed and pest pressure) by selecting a parameter value for each agricultural plot from a range of possible values according to adequate statistical distributions. More investigations are needed to characterize these distributions and how weed and pests affect crop yields.

3.8.2 Advantages of the model

The TERROIR model is used here to assess current agro-sylvo-pastoral landscapes. The main advantage of this multi-level modelling approach is to avoid researchers having to actually collect data on all the biomass flowing in the households and villages, which is time and labor consuming. The model also provides spatialized data at plot level, which is a level of precision that is difficult to reach when conducting surveys on biomass flows. The basic input data required by the model are rainfall, landscape structure (proportion of land units) and household diversity (based on generic types) (Table 4); even though more detailed parameters can be adjusted to better fit simulated situations (e.g. size and resource endowment of households).

As pointed out by Jones et al. (2017), very detailed models are more accurate in their representation of biophysical processes but require extensive data for parameterization — which are not necessarily available in every West African context. Our model uses simple empirical biophysical sub-models that were chosen to be equivalent in terms of granularity. Crop and animal sub-models were built with respect to each other in order to increase compatibility between the different parameters and to integrate their interactions (Jones et al., 2017; Thornton and Herrero, 2001). Particular attention was paid to including in the model key processes that affect flows between system components, including exchanges between households, and the spatial organization of these flows. Biomass flows are more sensitive to detailed decisional processes on allocation of limited resources across the system, and organic matter recycling within the system than to increased accuracy of biophysical sub-models, as demonstrated by van Wijk et al. (2009) for a farm model.

These modeling choices were confirmed by the model's ability to satisfactorily reproduce two different village situations in which biomass management practices are contrasted (cf. §5.2.2). Practices relating to free-grazing but also to in-barn fattening and corresponding manure management are taken into account. As these two situations are two extreme systems (pure extensive versus pure intensive) we can assume that the model can also represent intermediate systems (mixed extensive and intensive systems) where both night corralling, and solid manure storage and spreading are practiced in the same village.

Extrapolation is a common practice in model-based nutrient cycle analysis to project data from household to village level (Andrieu et al., 2015; Rufino et al., 2011); the indicator at village level is generally the indicator at household level weighted by the share of household types in the village household population. In this case, there is a high risk that village level N in and outflows will be overestimated because flows within the village and flows to and from the market outside the village are not distinguished, and all in/outflows at household level are considered as in/outflows at village level. Extrapolating household level data to the village level does not capture interactions between households. Our model shows that interactions are non-negligible as they account for 8% and 2% of the total N flows at village level in Vext and Vint, respectively. This does not represent an extrapolation but rather an aggregation, as multi-agent modelling integrates interactions between the model entities and distinguishes all entities. It consequently isolates direct (sales, purchases and gifts) and indirect (via livestock mobility) interactions between households and with common resources (such as rangelands) within the village. It reduces the loss of information during upscaling. It explains why N balances and efficiencies differ depending on the level of analysis (Table 5). For instance, the N balance at village level is higher in Vext than at household level; it is the opposite in Vint, where there are fewer exchanges and no rangelands. Another indication of the importance of simulating interactions is that the same household type performs differently depending on its environment. For instance, CS households have higher N balances in Vint than in Vext, because they take advantage of higher N imports within the village by market-oriented households that predominate in Vint (Table 5).

The use of two conceptual stock-flow models (Figure 4 and Figure 5) makes it possible to distinguish between the different entities, compartments and their spatialization. It highlights where bottlenecks appear along the N cycle and where improvements could be made. For instance, bush fields are more likely to lack N than home fields; it shows that distinguishing the different land units in the model is important in the analysis of agro-sylvo-pastoral landscapes. This difference is mainly due to limited access to mineral fertilizers and the choice made to concentrate organic fertilizers in home fields first. Simulations also show that there is an accumulation of manure in housing areas, particularly in Vint, where more N flows circulate and where more N is in the form of solid manure managed by humans. This results in a lower N return to crop lands and hence in lower recycling

efficiency in Vint. This is explained by limited equipment and lack of a workforce to spread the manure (Audouin et al., 2015).

3.8.3 Further uses

The TERROIR model can also be used to simulate and design improved new systems in a “What If?” approach (McCown, 2002). For instance, simulated scenarios can test various manuring capacity levels, corresponding to different levels of equipment and sizes of workforce to spread the manure. In a context of limited N resources, scenarios that change the decision rules for organic fertilizer allocation, e.g. concentrating manure in home fields versus homogeneous spreading of manure throughout the landscape, could also be tested to test its consequences for the productivity of the village as a whole.

In this paper we focused on “actionable” flows, which facilitates the identification of options to improve systems and as they are more concrete processes to handle and discuss with farmers. However, the model also calculates flows relating to losses to the environment (“biophysical” flows), e.g. when manure accumulates in a manure heap, about 25% of the N is lost to the environment due to N volatilization and leaching, which corresponds to estimations made for other crop-livestock systems in sub-Saharan Africa (Rufino et al., 2006).

Here, we only calculated indicators related to agro-ecosystem productivity, soil fertility and N recycling efficiency but more indicators can be calculated by the model on the basis of N flows to analyze the structure, functioning and performances of agro-sylvo-pastoral landscapes (Stark et al., 2016). For instance, it is possible to assess the system independency towards external inputs and hence its potential sensitivity to market fluctuations. Nitrogen is not the only element that explains the performances of agro-sylvo-pastoral landscapes, particularly in crop production and soil fertility management. Phosphorus (P), potassium (K) and carbon (C) can be integrated in the model through the conversion of biomass flows into these elements, as done here for N. This could then be used to assess N/P and C/N ratios, which determine the dynamics of some biophysical processes (Pieri, 1989; Powell et al., 2004). N and C flows, including greenhouse gas emissions and C sequestration, can also be used to assess environmental indicators such as the impact on climate change (Soussana and Lemaire, 2014). Biomass flows can also be used to calculate socio-economic indicators such as working hours and cash flows (Vayssières et al., 2009a).

These complementary indicators may be useful to design improved agro-sylvo-pastoral landscapes (Bonaudo et al., 2014) and to analyze trade-offs between the environmental, technical and socio-economic dimensions of sustainability (Tittonell et al., 2007a).

3.9 Conclusion

The TERROIR model was used here to represent the spatial dynamics of biomass and N recycling within an agro-sylvo-pastoral landscape over a period of one year. It was used to analyze the organization of the N cycle and related impacts on soil fertility and N recycling efficiency in two contrasted villages:

- (i) an extensive system (Vext) based on free-grazing herds and a landscape structure favorable to herd mobility;
- (ii) an intensive system (Vint) based on in-barn livestock fattening and an entirely cultivated landscape.

The model-based comparison showed that the two villages are contrasted in terms of N cycle organization. Vint imports and exports more N and has more circulating flows within the system than Vext. The intensification of N flow in Vint corresponds to an increase in both crop and livestock productivity. N balances are also higher in Vint than in Vext, at all levels of analysis, at the plot level in particular, indicating higher risks of soil N mining in Vext. However, Vext is more efficient than Vint. Interweaving two conceptual stock-flow models underlined that:

- (i) an increasing fertility gradient from the core land units to periphery is shared by the two villages;
- (ii) N accumulates in the form of manure in the heap compartment and in the housing land unit (a not-cultivated area), in Vint in particular.

This results in limited N returns to crops and negatively affects N recycling efficiency of villages, and suggests improvement options related to manure management.

Model evaluation based on N flows, showed that, despite a tendency to underestimate flows in the model simulations, the main observed differences between the two villages are well reproduced by the model at the three levels of organization. Distinguishing low level entities (land plot and herd, households) as individual interacting entities makes it possible to aggregate data at the highest level (village) without losing any information while upscaling. As done here with the TERROIR model, the multi-level modeling of nutrient cycling is a promising option for identifying bottlenecks in nutrient cycles and locating them in agro-sylvo-pastoral landscapes. The model can also be used to explore new improved agro-sylvo-pastoral landscapes in order to increase their efficiency and productivity. It is also possible to calculate supplementary environmental and socio-economic indicators on the basis of biomass and nutrient flows for a more complete assessment of the sustainability of the systems under study.

Acknowledgments

This work was supported by the French National Research Agency (ANR) [Projet ANR-13-AGRO-002, CERA0, Programme Agrobiosphère]. The authors would like to thank François Affholder (CIRAD, UPR AIDA) for his help regarding the cereal biophysical model, and Peter Biggins (CIRAD) and Daphne Goodfellow for checking the English manuscript. We acknowledge the thoughtful work of the three reviewers, which helped us considerably improve our manuscript.

3.10 Supplementary material: The TERROIR model detailed description including equations and parameters

This supplementary material provides an exhaustive description of the TERROIR model which was built in order to analyze nutrient recycling and spatial transfers within agro-pastoral village landscapes in a tropical context. Outlines of the model and model evaluation can be found in the main paper. In this document, the choice of the modelling platform is first explained. Then data is provided as extra information for the model overview. Model variables and parameters are then detailed, before being used in the last three sections that deal with the sub-models (biophysical processes, household decision model and livestock system).

3.10.1 General information on the model

3.10.1.1 Modelling platform choice

The model is implemented on the GAMA platform which is often used in the domain of natural-resource management (Gaudou et al., 2014; Therond et al., 2014). It is described as a “modelling and simulation development environment for building spatially explicit agent-based simulations” (<http://gama-platform.org/>) (Grignard et al., 2013). The platform framework allows an explicit representation of the environment and the various stakeholders interacting within the modelled system (Taillandier et al., 2014). Even though GIS data are not currently used in this model, this possibility is offered by Gama and, indeed, it is one of its perspectives of evolution. In the GAMA representation, the environment is an agent among others. All the agents (called “species”) can be hierarchized with an inheritance scheme allowing multi-level and multi-scale modelling of complex systems as targeted for this model. The current version of the model is coded in Gama 1.7.

3.10.1.2 Biomass types used in the model

Table 8. Biomass types dealt with in the model

N°	Biomass type	Specific biomasses	Storable by household?	Is fertilizer?	kgTNM/kgDM	kgN/kgDM	Source
1	1 Livestock	Bovine	No	No	-	0.034*	(Rufino et al., 2009a)
2	1 Livestock	Small ruminant	No	No	-	0.025*	(Rufino et al., 2009a)
3	2 Forage	Grass (graminae)	No	No	0.128 (rainy season)	0.020	(Le Thiec, 1996)
					0.039 (dry season)	0.006	
4	2 Forage	Straw	Yes	No	0.06	0.010	(Le Thiec, 1996)
5	2 Forage	Hay	Yes	No	0.107	0.017	(Le Thiec, 1996)
6	2 Forage	Leaves	No	No	0.13	0.021	(Depommer and Guérin, 1996)
7	2 Forage	Fresh grass	No	No	0.128	0.020	(Le Thiec, 1996)
8	3 Concentrate feeds	-	No	No	0.35	0.056	(Le Thiec, 1996)

continued on the following page

N°	Biomass type	Specific biomasses	Storable by household?	Is fertilizer?	kgTNM/kgDM	kgN/kgDM	Source
9	4 Seed	Cereal	Yes	No	See 11. Cereal grain		
10	4 Seed	Groundnut	Yes	No	See 12. Groundnut		
11	5 Food	Cereal grain	Yes	No	0.112	0.018	(Le Thiec, 1996)
12	5 Food	Cereal pod	Yes	No	0.153	0.024	(Le Thiec, 1996)
13	5 Food	Cereal cob	Yes	No	-	0.021	(Le Thiec, 1996)
14	5 Food	Groundnut grain	Yes	No	-	0.080	(Schilling and Gibbons, 2002)
15	5 Food	Groundnut husk	Yes	No	0.060	0.010	(Le Thiec, 1996)
16	5 Food	Groundnut unhusked	Yes	No	-	0.059	(Le Thiec, 1996)
17	5 Food	Fish	No	No	0.24 (1.2kgTNM/kgFW)	0.038	(Huss, 1999; Murray and Burt, 2001)
18	5 Food	Rice	No	No	0.112	0.018	(Le Thiec, 1996)
19	6 Fuels	Gathered dung	No	No	Depend on dung deposited and N losses (see §3.10.3.3)		
20	6 Fuels	Wood	Yes	No	-	0.0076	(Jung, 1969, p. 4)
21	7 Mineral fertilizer	Mineral fertilizer	No	Yes	-	0.15	
22	8 Human waste	Kitchen waste	No	Yes	Depend on household consumption (see §3.10.3.3)		
23	9 Livestock waste	Dung	Yes	Yes	Depend on livestock ingestion (see §3.10.4.2)		
24	9 Livestock waste	Urine	No	Yes	Depend on livestock ingestion (see §3.10.4.2)		
25	9 Livestock waste	Feed refusals	Yes	Yes	Depend on livestock ingestion (see §3.10.4.2)		
26	9 Livestock waste	Manure (dung, urine, feed refusals)	Yes	Yes	Depend on livestock ingestion (see §3.10.4.2)		

TNM = total nitrogenous matter; DM = dry matter; * kgN/250kg of live weight

3.10.2 Model variables and parameters

3.10.2.1 Global variables and parameters

3.10.2.1.1 Default parameters

Table 9. Global parameters: default values

Type	Name	Value	Unit	Description
int	daysPerStep	1	day	length of a time step (day)
int	weeklyActivity	7	day	for activities that happen every 7 time steps
int	monthlyActivity	30	day	for activities that happen every 30 time steps
float	year_duration	360	day	length of a year (day)
int	nb_year_simulated	Defined by user (range: 1 to 20)	year	number of years simulated (year)

* a year is 12 months of 30 days, i.e. 360 days

3.10.2.1.2 Period determination

In the model the **rainy season** is a determinant period as its beginning launches the cropping season. Its beginning date and duration are global, yearly updated, variables. The rainy season is followed by two dry seasons: the hot dry season and the cold dry season which are hard to differentiate and do not determine the execution of any process in the model. In practice, during the hot one, households usually harvest crop plots for about two months plus two additional months dedicated to storage organization. Usually, the end of harvest coincides with the beginning of the cold dry season. At that period, the cropping season is over and plots can be prepared for the forthcoming one (fertilization, sowing).

Table 10. Global parameters related to model periods

Type	Name	Description	Concerned period	Value	Unit	Source
int	day_beg_rain	date for rainy season to start	rainy season (RS)	Defined by user (default = 10)	day	-
int	lengthRainySeason	length of the rainy season	rainy season	65	day	
int	day_beg_faitherbiaCycle	date for tree growth to start	tree growth	165	day	(Depommier and Guérin, 1996)
int	length_faitherbiaGrowth	length of the tree vegetative cycle	tree growth	100	day	(Depommier and Guérin, 1996)
int	beg_fat_after_rain	date for fattening period to start after the end of RS	fattening period	30	day	

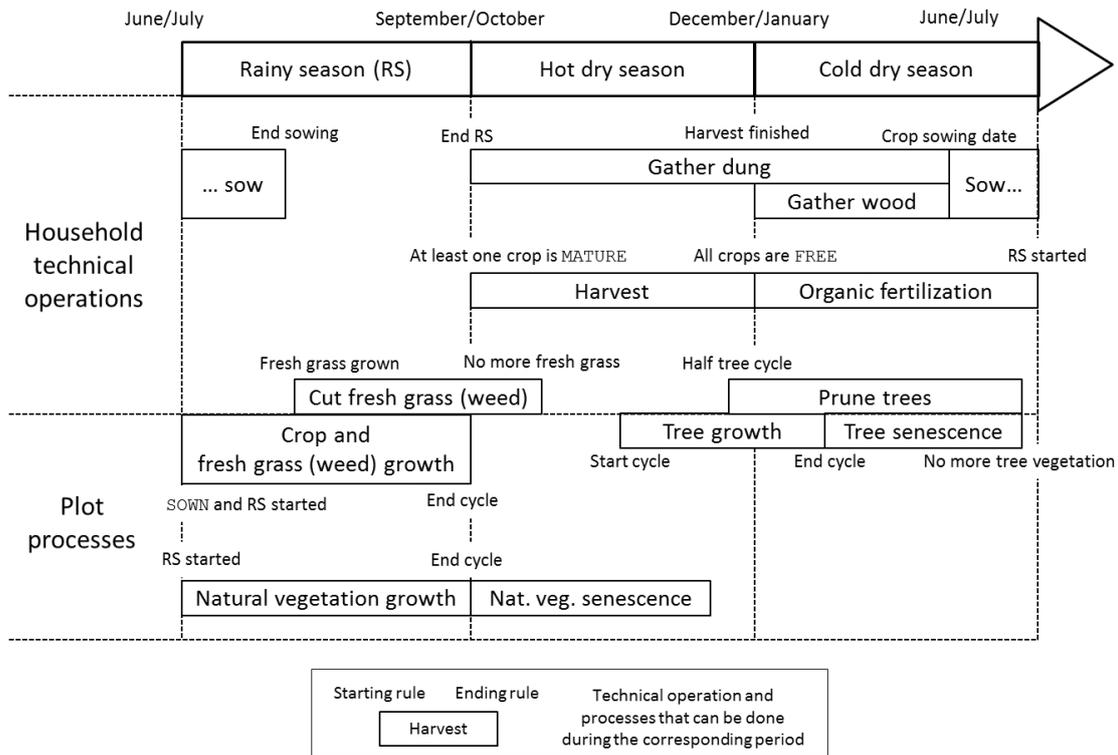


Figure 21. A typical seasonal calendar and periods for technical operations simulated in the model (for a simulation where rainfalls start in the beginning of July and end in October)

3.10.2.1.3 Model initialization

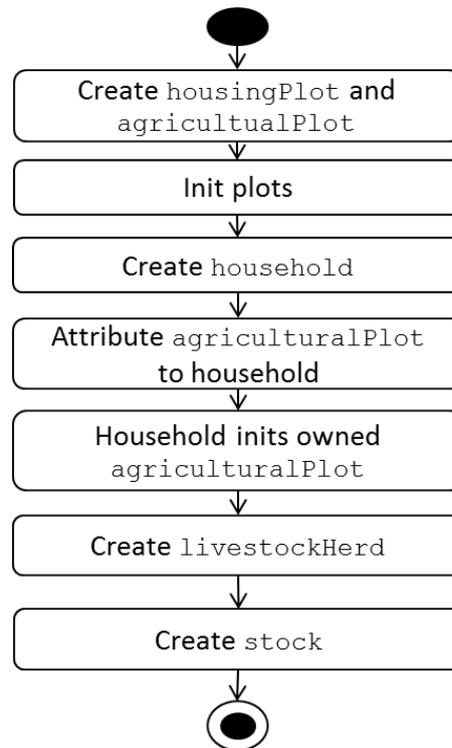


Figure 22. Initialization diagram

First the village landscape (land plot entities) is created and, depending on its structure (input data), a distinction is made between housing and agricultural plots. Then households are created. The number of households and the proportion of each type within the village population are global parameters chosen by the user according to the case study. Household structures are initialized in order to be as close as possible to the actual population of its type within the village, based on a Gaussian distribution. Each household agent sequentially and randomly chooses random plots one after the other until it reaches the area it was previously

assigned for each land unit starting with home fields, then bush fields. This random distribution of plots in space mimics observations in real Senegalese villages. Due to causes such as land inheritance and strategies for adapting to climatic risks— (Akponikpe et al. (2011)), the plots belonging to households look like they are randomly scattered all over the village landscape. Depending on the household type, household assets are instantiated differently for specific attributes such as the cropping plan for agricultural plots, livestock herd management and initial stock level (cf. §3.10.2.2 for initialization data).

3.10.2.2 Agent parameters and variables

This section details agent parameters (i.e. constants fixed at initialization) and variables.

3.10.2.2.1 Land plot

3.10.2.2.1.1 Parameters

Table 11. Land plots (i.e. housing and agricultural plots) constant parameters

Parameter	Description	Type	Unit	Initialization
ID	plot name	string	dimensionless	incremental numbering
area_ha	plot area	float	hectares	input from user (external file)
myLandUnit	plot land unit	string	dimensionless	input from user (external file)
nb_tree	number of trees on the plot	integer	Number of trees	input from user (external file)
myOwner (agricultural plot only)	household that owns the plot	household ID	dimensionless	initialized by the owner household
croppingPlan (agricultural plot only)	list of the various land uses year after year	list<string>	dimensionless	initialized by the owner household

3.10.2.2.1.2 Variables

Housing and agricultural plots have common variables, relating to trees (Table 12). In the model, two pruning states are distinguished, depending on whether trees were pruned during the current tree vegetative cycle (`prunedTrees`) or not (`notPrunedTrees`). For a given simulated tree vegetative cycle, each time a new tree is pruned, it shifts from the not pruned trees list to the pruned trees list. Among these pruning states, trees are clustered according to the pruning intensity. The pruning intensity refers to the last pruning year. Trees not pruned the last 2 years are indexed 0; trees pruned the year $n-1$ are indexed 1; trees pruned the year $n-1$ and year $n-2$ are indexed 2. Then, available tree vegetation is given for each pruning state and intensity. All trees produce wood (`deadwoodStock`) that can be collected as dead wood for fuel, for home consumption.

Unlike housing plot that does not have more variable; agricultural plots have specific variables (detailed in Table 13).

Table 12. Land plot (i.e. housing and agricultural plots) variables and time scales

	Variables	Description	Type	Unit	Initialization	Variation frequency
1	notPruned Trees	for each pruning intensity (3 types: {0,1,2}), lists the number of trees not pruned (in the current year) and the total vegetal production available	map<int, <int, float>>	state: dimensionless		annually
				number of trees: dimensionless		daily
				vegetation available on trees: kgDM		
2	pruned Trees	for each pruning intensity (3 types: {0,1,2}), lists the number of pruned trees (in the current year) and the total vegetal production available	map<int,<int, float>>	state: dimensionless		annually
				number of trees: dimensionless		daily
				vegetation available on trees: kgDM		
3	deadwood Stock	quantity of dead wood available on the plot	float	kgDM		weekly
4	balance_ kgNapparent			kgN/ha		

¹ For instance: the map notPrunedTrees ([0::(2::2.3), 1::(0::0.0), 2::(4::5.2)]) means that, for the given plot and the current year, there are 2 trees not pruned with a total of 2.3 kgDM of vegetation available, with a pruning intensity of 0; 0 tree (and no vegetation) with a pruning intensity of 1; 4 trees with a total of 5.2 kgDM of vegetation available with a pruning intensity of 2.

Table 13. Agricultural plot variables and time scales (as variation frequency)

Type of variable	N°	Variables	Description	Type	Unit	Frequency
Status	1	status	status of the plot (free, planted, on growth, mature, product harvested) and date at which it was reached	pair<integer, string> (day, status)	dimensionless	weekly
Biomass production (related to croppingPlan)	2	planYear	index to determine at which stage of the cropping plan the plot is (1= first year, etc.)	integer	dimensionless	annually
	3	landUse	use of the plot (millet, groundnut, fallow, natural vegetation)	string	dimensionless	annually
	4	future_landUse	land use of the plot for the next year	string	dimensionless	annually
Biomass production (related to landUse)	5	product_yields_current_cropping_season	output for the current cropping season for the various products	map<string, float> (product, quantity)	kgDM/year	annually
	6	yieldHaPerCrop	last yields reached for each crop	map<string, float> (crop, quantity)	kgDM/ha/year	annually
Biomass production (related to fertilization)	7	fertilizationPriority		int	dimensionless	annually
	7	organicFertilization Targeted	quantity of organic fertilization targeted for the current year	float	kgDM/year	annually
	8	organicFertilization Input	quantity of organic fertilizer actually applied for the cropping season (i.e. starts/ends at sowing)	float	kgDM/year	weekly
	9	fertilizer Input	list of fertilizers applied on the plot (all types)	map<string, float> (fertilizer, quantity)	kgN/year	daily
	10	organicFertilization Status	ratio applied/targeted quantity of fertilizer for each year of the simulation	map<integer, float> (year, ratio)	dimensionless	daily
Resources stock	11	NStock	stock of soil nitrogen	float	kgN/year	weekly
	12	plantStocks	stock of live vegetation biomass	map<string, float> (product, quantity)	kgDM/year	weekly
Interaction with livestock	13	isGrazable	if true, livestock herd can be corralled on the plot and/or graze on it	boolean	dimensionless	bi-annually
	14	paddockedLivestock	ID list of livestock herds corralled on the plot	list<livestock herd ID>	dimensionless	weekly

Table 14. Land uses and possible corresponding land units

Land use	Land unit	Biomass type	Products	Co-products
Dry cereal	Home fields, bush fields	Crop	Grain	Straw
Legume crop	Bush fields	Crop	Grain	Hay
Fallow	Bush fields	Natural vegetation	Grass	Nil
Rangeland vegetation	Rangeland	Natural vegetation	Grass	Nil

3.10.2.2.2 Household

3.10.2.2.2.1 Household types

Table 15. Household types in the model

Type name	Abbreviation
Livestock-subsistence oriented	LS
Livestock-market oriented	LM
Crop-subsistence oriented	CS
Crop-market oriented	CM

3.10.2.2.2.2 Parameters

Table 16. Household agent constant parameters

	Parameters	Description	Type	Unit	Initialization
1	ID	household name	string	dimensionless	incremental
2	home	Plot where the household is located	Housing plot ID	dimensionless	any housingPlot
3	type	Type of household (LS, LM, CS, CM)	string	dimensionless	-
4	myAgriculturalPlots	Agricultural plots owned by the household	list<plot>	dimensionless	depends on household type
5	myLivestock	livestock herds owned by the household	list<livestockHerd ID>	dimensionless	depends on household type
6	myStocks	Stocks of biomasses owned by the household (food, fuels, feeds, fertilizers)	list<stocks ID>	dimensionless	one stock per type of storable biomasses (list in Table 8)
7	inhabitants	Number of people in the household	integer	adult equivalent	depends on the household type
8	theDump	plot where the household disposes its wastes	plot	dimensionless	closest agricultural plot from home

Table 17, Table 18, Table 19 and Table 20 show the initialization figures for the creation of livestock herd agents for household agents (`value_TLU` cf. Table 23). Each household agent gets livestock herds according to its type, based on Audouin et al. (2015). The size of every herd agent depends on the household and is based on a Gaussian distribution (mean and standard deviation) of the household type population. It is expressed in Tropical Livestock Unit (TLU) corresponding to one animal of 250kg live weight.

Table 17. Household initialization: livestock attribution to CS households (n = 92 households)

Management	Number of herds	Specie	Average TLU	Standard deviation TLU
Free-grazing	1	small ruminant	3.7	0.2
Total	2		3.7	

Table 18. Household initialization: livestock attribution to CM households (n = 14 households)

Management	Number of herds	Specie	Average TLU	Standard deviation TLU
Fattening	1	bovine	1.0	0.2
	1	small ruminant	2.0	0.2
Draft animals	1	equine	1.0	0.1
Total	3		4.0	

Table 19. Household initialization: livestock attribution to LS households (n = 5 households)

Management	Number of herds	Specie	Average TLU	Standard deviation TLU
Free-grazing	1	bovine	3.5	0.2
	1	small ruminant	3.7	0.2
Total	2		7.3	

Table 20. Household initialization: livestock attribution to LM households (n = 3 households)

Management	Number of herds	Species	Mean TLU	Standard deviation TLU
Fattening	1	bovine	2.5	0.2
	1	small ruminant	3.0	0.2
Draft animals	1	equine	1.0	0.1
Total	3		6.5	

When agricultural plots are allocated to households, households, according to their type, assign them a cropping plan that will determine the yearly rotation on the land plot. There are currently three possible cropping plans as described in Table 21.

Table 21. Agricultural plot initialization: cropping plans according to land units and types of cropping management

Land unit	Household type	Cropping plan length (years)	Rotation (land use)
Home fields	all types	1	millet
Bush fields	LS, CS	3	millet, groundnut, fallow
Bush fields	LM, CM	2	millet, groundnut

3.10.2.2.3 Variables

Table 22. Household variables and time scales

	Variables	Description	Type	Unit	Variation frequency
1	foodNeeds	requirements of food for the household according to its type	map<string, float> (food, quantity)	kgDM/week	weekly
2	combustible Need	requirements of firewood for the household	Float	kgDM/week	weekly
3	dungGathered	true if dung was gathered during the current week	Boolean	dimensionless	weekly
4	activityFlows	month flow of biomass among farming compartments (household, plot, livestock, granary, fertilizers)	map<string, map<string, map<string, float>>> (origin, destination, biomass type, quantity)	kgN/day	daily
5	landUnit Flows	biomass flows among land units (housing areas, home fields, bush fields, rangeland)	map<string, map<string, map<string, float>>> (origin, destination, biomass type, quantity)	kgN/day	daily

3.10.2.2.3 Livestock herd

3.10.2.2.3.1 Parameters

Livestock parameters described in Table 23 are provided by household agents.

Table 23. Livestock herd constant parameters

	Parameters	Description	Type	Unit
1	myOwner	household that owns the herd	household	dimensionless
2	mySpecies	species (bovine, small ruminant or equine)	string	dimensionless
3	management	type of livestock management (fattening, free-grazing, draft animals)	management	dimensionless
4	value_TLU	quantity of animals in the herd	Float	Tropical Livestock Unit (TLU) ¹
5	stepPurchase (fattening)	date when the herd was purchased by the household	integer	day
6	fatteningDuration_day (fattening)	time the herd will stay within the household before being sold	integer	day

¹ 1 TLU is equivalent to 1 animal of 250kg live weight

3.10.2.2.3.2 Variables

Table 24. Livestock herd variables and time scales

	Variables	Description	Type	Unit	Variation frequency
1	forageNeed_TLU pday	forage need per day for 1 TLU	Float	kgDM/TLU/ day	weekly
2	herd_forageNeed _dDay	herd forage need for the current day	Float	kgDM	daily
3	previousDay Ingestions	type of biomass and quantities ingested on the previous day by the herd	map<string, float> (biomass, quantity)	kgDM	daily
4	dDayIngestions	type of biomass and quantities ingested per plot on the current day by the herd	map<plot, map<string, float>> (plot, biomass, quantity)	kgDM	daily
5	myCorral (free-grazing)	agricultural plot where the herd is corralled at night	Plot ID	dimensionles s	weekly
6	concentratedFeed Need_TLUdDay	concentrate feeds need per day for 1 TLU (fattening, draft animals)	Float	kgDM/TLU/d ay	weekly

Livestock variables related to feed needs are initialized according to their species and management. Forage and concentrate feeds needs are evaluated in kgDM/TLU/day and depend on the species and management of the livestock herd. Forage needs quantities are described in Table 25 according to the forage quality in terms of energy input (high or low). Low quality forages are straw while high quality forages are fresh grass and hay. Free-grazing herds mainly fulfill their forage needs with grass while grazing and do not receive concentrate feeds. Concentrate feeds needs are detailed in Table 26.

Table 25. Initialization: livestock forage need (kgDM/TLU/day)

Management \ forage quality	bovine		small ruminant		equine	
	low	high	low	high	low	high
free-grazing	3	0	2	0	nil	nil
fattening	3	2	2	1	nil	nil
draft animals	nil	nil	Nil	nil	3	2

Table 26. Initialization: livestock concentrate feeds need (kgDM/TLU/day)

Management \ Species	bovine	small ruminant	equine
free-grazing	0	0	nil
fattening	3	2	nil
draft animals	nil	nil	2

At initialization, draft animals and fattening herds are located on their owner's home (i.e. on a `housingPlot`). Free-grazing herds are located on a corral (`myCorral`). The corral initialization is either an agricultural plot in fallow (`landUse`) that belongs to its owner or a plot from the land unit rangeland.

3.10.2.2.4 Stock initialization

In this version of the model, all stock levels are initialized at 0kgDM except for the ones stocking seeds. In this case, the exact quantity of seeds required for the first year is set (equation of seed need in §3.10.3.2.1).

3.10.3 Details on the household decision model

3.10.3.1 Levels of implication in the activities for each household type

Table 27. Level of implication of the household types in the farming activities

Activité	Opération technique	Principales contraintes	LS	LM	CS	CM
Fertilisation	Applique l'engrais minéral	Finances	1	3	1	3
	Parquer les animaux	Accessibilité des champs	3	1	2	1
	Epandre le fumier	Matériel, animal de traction et main d'œuvre	1	3	1	2
Semis	Semer céréales sèches	Main d'œuvre; animal de traction	3	3	3	3
	Semer arachide	Main d'œuvre; animal de traction; pluie	1	3	1	3
Entretien des champs	Nettoyer pré-semis	Main d'œuvre	3	3	3	3
	Sarcler/démarayer	Main d'œuvre; animal de traction	3	3	3	3
Alimentation des animaux de trait	Nourrir avec des concentrés	Finances, prix du marché	1	2	1	2
	Nourrir avec des résidus de récolte	Stock/récolte	1	2	1	2
	Nourrir avec des fourrages verts	Main d'œuvre; disponibilité de la ressource (saison)	1	2	1	2
Elevage extensif	Nourrir avec des fourrages	Stock/récolte	2	1	1	1
	Guider le pâturage	Disponibilité de la ressource; accessibilité des champs	3	1	1	1
Embouche	Acheter bétail	Finances; prix du marché; disponibilité aliments	0	3	0	2
	Nourrir avec des concentrés	Finances, prix du marché	0	3	0	2
	Nourrir avec des résidus de récolte	Stock/récolte	0	3	0	2
	Nourrir avec des fourrages verts	Main d'œuvre; disponibilité de la ressource (saison)	0	3	0	2
	Vendre (bétail embouché)	Animal gras	0	3	0	2
Gestion des stocks	Vendre (cultures de rente)	Quantité récoltée	1	3	1	3
	Vendre (fourrage)	Besoin ; quantité récoltée	2	3	1	3
	Vendre (céréales)	Besoin ; quantité récoltée	1	3	1	3
Cuisine	Cuisiner	Nombre d'habitants, stock, finances	3	3	3	3

Du plus clair au plus foncé : 0: non concerné ; 1 peu concerné ; 2 concerné ; 3 très concerné

LS : livestock-subsistent household; LM : livestock-market ; CS: crop-subsistent ; CM: crop-market

3.10.3.2 Cropping activities parameters

3.10.3.2.1 Fertilization

Fertilization is the main cropping activity that will strongly impact biophysical processes on agricultural plots and in livestock activities. Each household has fertilization objectives. Even though the fertilization inputs processed in the model are computed in kgN per hectare, the household fertilization objectives are given in kgDM per hectare. Indeed, real households reason their fertilization rates rather in terms of the quantity to be spread than in terms of the N content of the manure, which is much harder to determine. As not all plots can be fertilized each year, the households determine priorities between their plots e.g.: first home fields, then bush fields with cereals, then a plot with low yield in the previous year. Plots without owners (e.g. rangeland plots) receive fertilization indirectly when the livestock moves through the village to graze and excrete at the same time.

Crop plots can receive organic or mineral fertilizers. There are two ways of fertilizing a plot with organic matter. The first is using **livestock as a conveyor** especially by night corralling of the herds in targeted plots. This daily activity is undertaken by livestock herd agents. Excreted quantities (dung and urine) depend on the feed ingested the previous day. Excreta deposits are proportional to the time spent on the plot during the day (assumed to depend on the intake on the plot). The location of corrals is determined according to household fertilization plans, but if a plot is not available (e.g. because it is still cultivated), herds are corralled on fallow. Draft and in-barn animals excrete in barns. In that case, the urine is lost but the dung is collected with feed refusals to produce manure. The second fertilization method is by **manual application** of heaped manure and waste. Manure is spread by households on their agricultural plots during a given fertilization period. The maximum quantity spread per week depends on the cart size, as real farmers usually carry one cart per week to their fields. In the current version of the model the cart size is the same for all households. One plot is targeted until organic fertilizer requirements have been fulfilled.

The quantity of nutrients available to crops depends on the quantity of organic fertilizer applied, its mineralization rate, environmental losses and nitrogen fixation. Gaseous emissions (N_2O , NH_3) take place, with the organic matter being either directly excreted by the livestock excreta or spread by households. In the model, these losses are calculated based on the literature using a ratio of gaseous N emitted per kg of N applied as fertilizer. While all mineral nutrients are, for the sake of simplicity, assumed to be directly available for plant growth, it is assumed that only a part of the organic matter is mineralized the first year of application and thus becomes available for the crop. A residual effect due to organic matter mineralization the following years is included in the model. Atmospheric fixation from free-living micro-organisms and symbiotic fixation by legumes are also included. Crop and grass yields are then computed using ad hoc models such as the CELSIUS model based on the Potential Yield Estimator (Affholder et al., 2013).

In the current version of the model, organic fertilization objectives are the same for all types of cropping systems : 15,500 kgDM/ha for home and bush fields (Achard and Banoïn, 2003; Hiernaux et al., 1997; Powell et al., 2004). In the model, targeted quantities are in kgDM per hectare which is easier to compare to real practices (fresh weight converted into dry matter).

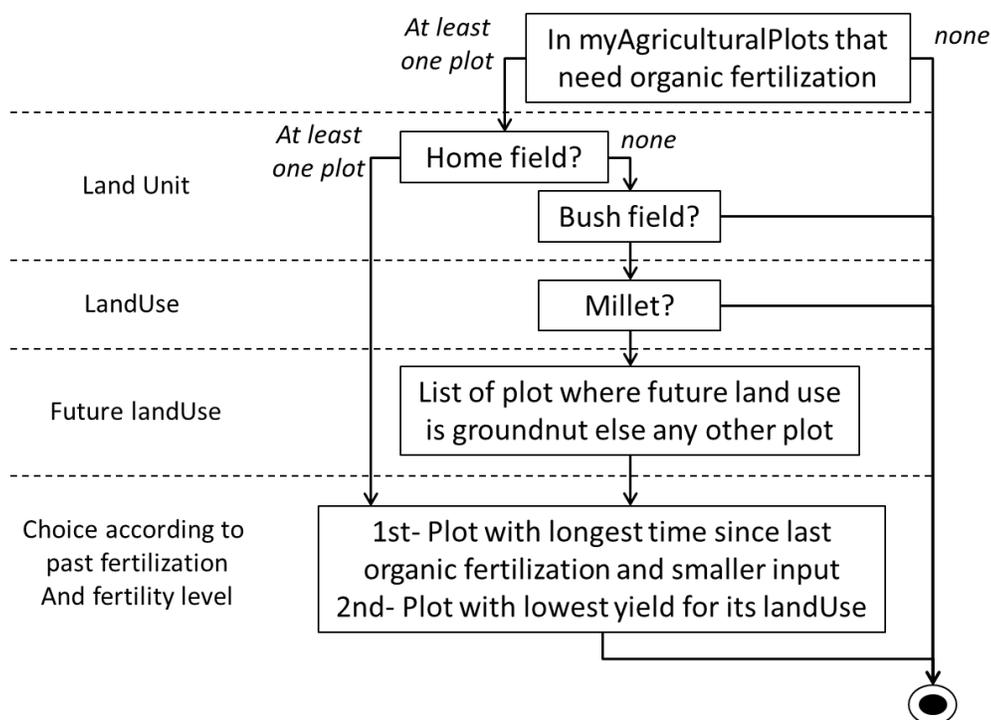


Figure 23. Household decision diagram for manure target choice (process of spreading manure)

Mineral fertilizers are assumed to be bought on an external market by households and applied right away at sowing. Purchased quantities depend on the household type (fixed by the user). There are two types of mineral fertilizers: one specific for millet and the other for groundnut.

In the modelled systems mineral fertilizers cannot be applied on all fields mainly due to economic constraints (Andrieu et al., 2015; Powell et al., 2004). Table 28 shows the quantity of mineral fertilizer (kgDM/household/year) available annually for each household, according to its type. Similarly, Table 29 shows the targeted quantities per land use and household type (in kgN/ha as available in literature, see Table 8 for conversion from DM).

As modelled households do not have the availability to buy enough mineral fertilizers for all their agricultural plots, they have to give priority to their plots. The basic rule implemented is that for a given land use, they first try to reach the objective quantity on their least productive plot (i.e. one plot with the lowest yield for the given land use). Table 30 shows the quantity of nitrogen gaseous emissions per type of fertilizer.

Table 28. Mineral fertilizer quantity per type of household

Household type	Millet	Groundnut	Source
	(kgDM/household/year)	(kgDM/household/year)	
Livestock-subsistence	10.0	0.0	Survey; (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)
Livestock-market	50.0	50.0	
Crop-subsistence	50.0	50.0	
Crop-market	67.0	50.0	

Table 29. Mineral fertilization objectives according to land use and household type (subsistence versus market-oriented)

Type	Land use	Targeted mineral fertilizer quantity (kgN/ha/year)	Source
Subsistence-oriented (LS, CS)	Millet	15	(Akponikpè et al., 2011; Pieri, 1989, p. 92)
	Groundnut	50	Survey; (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)
Market-oriented (LM, CM)	Millet	37	(Andrieu et al., 2015; Pieri, 1989, p. 92)
	Groundnut	50	Survey; (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)

Table 30. Nitrogen losses per type of fertilizer at application

Fertilizer type	Emission factor (kgN/kgN applied)	Source
Dung	0.2	(unpublished results)
Urine	0.6	
Manure	0.2	
Household waste	0.1	
Mineral	0.1	

3.10.3.2.2 Sowing

In the model, the sowing technical operation is affected by three levels of organization. First, at the village level, a general sowing period is determined as a range between the earliest sowing date and the latest sowing date. It starts when cereals can be sown (the month prior to the beginning of the rainy season) and ends when legumes are sown (after the beginning of rainy season). During this period crops can be sown if they are in their specific sowing period (see Figure 21). As described in Figure 24, during each sowing period, agricultural plots with the corresponding land use and of FREE status can be sown. Households perform the action of sowing by destocking seeds from their granaries. The destocked quantity is the sowing density for each crop (see Table 31). General equation for the required seed quantity is as follows:

$$SeedQuantity (kgDM) = agriculturalPlot\ area \times sowing\ density (landUse) \quad (1)$$

Where **agriculturalPlot area** is the plot area (hectares)
sowing density is specific to the crop (kgDM/ha) (see Table 31)

Table 31. Crop parameters: sowing activities

Crop type	Crop	Period	Sowing density	Seed dry content	Sowing density	Source
			(kgFM/ha)	(kgDM /kgFM)	(kgDM/ha)	
Cereal	Millet	Month prior to the beginning of the rainy season	5	0.925 (Le Thiec, 1996)	4.6	Survey
Legume	Groundnut	Week that follows the beginning of rainy season	55	0.86 (Le Thiec, 1996)	47.3	Survey; (Schilling and Gibbons, 2002)

Variables of sown agricultural plots change: they are not available for livestock anymore, they do not need organic fertilization and their plant stock is cleared (residual biomass is often burnt before sowing). Plots are fully sown at once in the model as the step for this technical operation is a week. Once an agricultural plot is sown, it is able to grow. It is assumed that there is no need of replanting crops in the model.

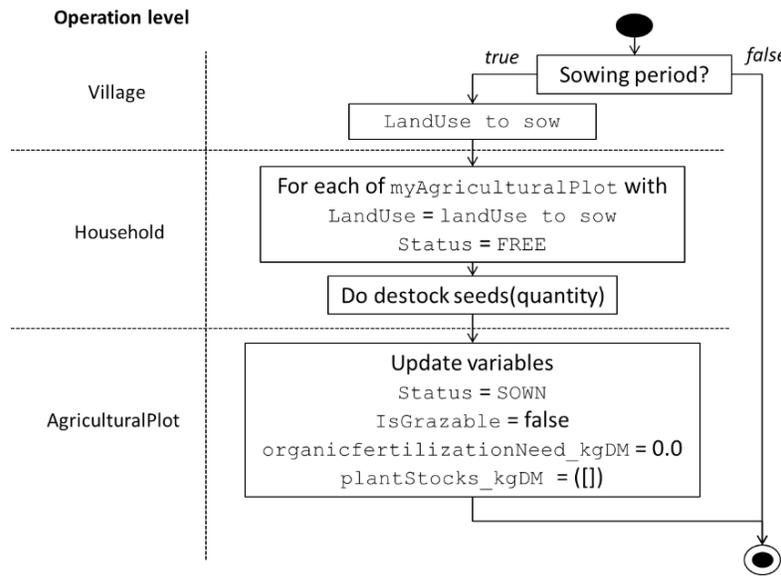


Figure 24. Activity diagram: sowing crops

3.10.3.2.3 Harvest

Harvest is undertaken every week during the village harvest period (*harvestPeriod*). It starts when at least one crop is of status *MATURE* and lasts until all agricultural plots are of status *FREE*. As described in Figure 25, during this period, crop products and co-products are harvested sequentially. First the main products of all agricultural plots are harvested. The harvested quantity is the total product of the plot stock. It is removed at once as the time scale for harvest is the week. Then, when there are no more products left in the household’s fields, co-products are harvested, i.e. removed from the plot plant stock.

In the studied villages, coproducts are not systematically harvested. This choice depends on many factors such as the labor availability, distance to the plot, family constraints, fertilization applied, etc. On average, only half of the coproducts are harvested, the rest is left on the plot. Thus, in the model, depending on the owner type, there is a quantity of coproducts not harvested (Table 32). Total yield produced is memorized by the plot and accessible for the household owner, if needed (e.g. in order to determine the less productive plot when deciding fertilization plan).

Table 32. Quantity of residues left in the field for each household type

	Livestock-subsistence	Livestock-market	Crop-subsistence	Crop-market
Quantity of residues left/total quantity (kgDM/kgDM)	0.80	0.0	0.65	0.5

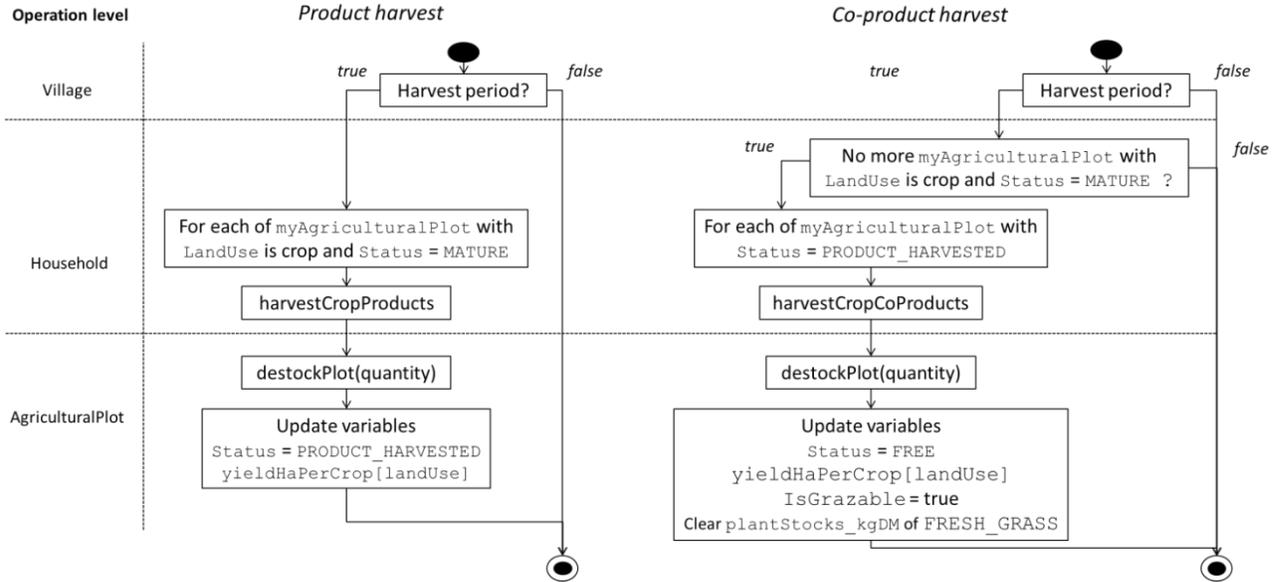


Figure 25. Activity diagram: harvest crop products (left side) and crop co-products (right side)

3.10.3.3 Home consumption parameters

Weekly operations aiming at feeding all the household members are defined in the model. As regards the two conceptual models (Figure 4 and Figure 5), these operations are directly related to the HUMAN compartment and the households' home (HOUSING AREAS).

3.10.3.3.1 Fuel

First of all, in order to cook, households need fuels. The required quantity is based on average firewood needs, function of the number of inhabitants within the households as described in Table 33. A conversion factor of wood into dung is used to obtain the dung needs. Fuels are collected on plots and either used directly (dung) or stored (wood). Wood and dung are only collected during specific periods, i.e. out of the rainy season (all places are accessible) and out of the harvest period (workload is too high). The target plot for wood gathering depends on the availability of dead wood on land plots; first households seek on their own plots then on any other plot. During wood gathering, households can also collect dung to fulfill their weekly needs. When wood gathering is not possible or when gathered dung does not fulfill the fuel needs, households must undertake other activities, as long as there is still a need. First if possible — i.e. in dung gathering period —, dung is gathered; then stored wood is used; then wood is purchased from another household; finally wood can possibly be bought on the market. During dry seasons, dung remains a few weeks on the surface of the plot and can possibly be gathered as fuel by any household; during the rainy season, dung decays too fast to be gathered because of humidity and high microbial activity.

$$FirewoodNeed (kgDM) = inhabitants \times firewoodNeed_pInhabitant \quad (2)$$

Where **inhabitants** is the number of inhabitants of the household (adult equivalents)

firewoodNeed_pInhabitant is the firewood need (kgDM/inhabitant/week)

Table 33. Home consumption parameters

Type	Parameters	Description	Value	Unit	Source
float	firewoodNeed	Need for firewood	0.1	kgDM/ inhabitant/ day	Survey (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)
float	dungOverWood	Conversion rate for firewood need into dung as a fuel	0.33	dimensionless	(Assouma, 2016; Lemmens et al., 2012)

3.10.3.3.2 Food needs and household waste production

Households have several **food needs** that depend on the type of food and number of inhabitants (Table 34). In the model, home consumption is a source of kitchen wastes, depending on the number of inhabitants within the household. These **kitchen wastes** are gathered weekly with **yard wastes** (dust, leaves) (0.25kgDM/inhabitant/day, based on surveys). It results in a conglomeration of waste: household waste, see Equation (3), dumped on the closest agricultural plot they own.

Table 34. Food needs and kitchen waste production

Food	Need (kgDM/inhabitant/day)	Source	Kitchen waste (kgDM/kgDM)	Source
Millet grain	0.5	(Andrieu et al., 2015); Survey; (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)	0.03	(Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)
Groundnut grain	0.05	Survey; (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)	0.02	(Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)
Rice	0.17 (0.19 x 0.880 kgFW/kgDM)	Survey; (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015) (Josserand and da Silva, 2002)	0.03	(Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)
Fish	0.04 (0.200kgFW x 0.20 kgFW/kgDM)	Survey; (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)	0.1	(Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltobroda, 2015)

$$\text{Household waste (kgDM/day)} = \text{kitchen wastes} + \text{yard wastes} \quad (3)$$

Where **kitchen waste** are the waste produced by the inhabitants while eating, function of the food ingested (see Table 34) (kgDM/day)

yard waste is the daily waste production produced while living within the household (dust, tree leaves, etc.) (kgDM/day)

3.10.3.4 Surplus estimations

Stock surplus, especially for food, feed and wood, is the difference between the estimated annual need for the given biomass and the actual stock level (at the end of the cropping season).

Annual need is based on the daily need of the household (see §3.10.3.3 for home consumption and §3.10.3.5.2 for livestock feed need) multiplied by the number of days per year (i.e. 360). Thus it is assumed that the daily need is constant over the year.

3.10.3.5 Livestock management

3.10.3.5.1 Livestock trade

Only herds on fattening management are traded. Other herds remain with the household for the whole simulation. Fattening herds have a fixed fattening cycle, i.e. the duration the herd will stay within the house before being sold on the market (`fatteningDuration_day`). Each sold herd is replaced by a new one, purchased on the market. New herds always have the same management and are of the same species than the sold herd. The new herd size in TLU is determined according to the same range as that used for herd initialization.

3.10.3.5.2 Livestock feeding

In the model, the households decide the targeted quantity they want their animals to ingest daily (herd needs). As described in Figure 26, there are different targeted levels in terms of forage quantity. First quantity level (Q1) is dedicated to outdoor forage (*Graminae*) and forages with low digestibility such as straw. It is considered as the only need for free-grazing livestock herds and a constant value for all managements. Quantity levels 2 (Q2a and Q2b) are used for gathered or stored forage with greater digestibility such as cut grass (weeds) and hay. These values are specific to fattening herds and draft animals. For the fattening management, it depends on the fattening cycle. For fattening herds, households aim to give more forage with high digestibility to its cattle a few weeks before selling it. Draft animals require more forage during cropping activities (manure spreading, sowing, crop harvesting). Table 35 and Table 36 show the forage quantities targeted for livestock herds, for each parameter from the Figure 26 (quantities: Q1, Q2, Q3 and Nw).

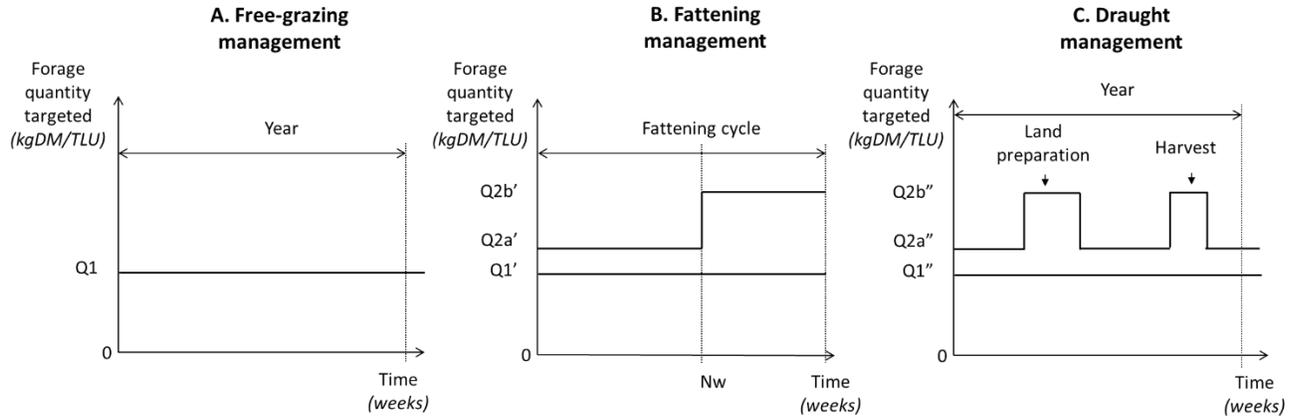


Figure 26. Forage targeted quantities according to livestock herd management

A. Free-grazing herd; B. Fattening herd; C. Draft animals

Q1 = in-field grass or straw; Q2 and Q3 = hay or cut grass; Nw is the number of weeks after the beginning of the fattening cycle before switching to increased feed quantities

Livestock herd feed needs can be fulfilled in four ways. The management type determines the preference for the forage origin. First of all, if the livestock is on free-grazing management, it grazes on an agricultural plot (see below). Then households can provide their herds with forage by destocking it from their own stock, buying it from another household or picking it up on agricultural plots. When forage is available in stocks, it will be used first. Then, depending on the herd management and period, it will be either gathered or bought. Gathered forages are cut fresh grass (weeds) and leaves from pruning trees.

Fresh grass is much used in West African crop-livestock systems as it is a good energy provider for fattening livestock (Powell et al., 2004). Thus in the model, only fattening herds and draft animals receive fresh grass. It is cut during the rainy season on agricultural plots. First, the priority is given to plots that belong to the herd owner and are closer from its home. Second, if no fresh grass is available in the households' plots, they collect it on the plots holding the highest quantity of it, even if they don't own it.

Leaves are directly pruned from trees and left in the agricultural plots for the livestock to graze. Leaves are dedicated to free-grazing livestock herds. The maximum quantity of leaves that can be pruned per year and per tree is fixed (`maxLeavesPrunedQuantity_kgDM_ptree`), as well as the ratio of pruned wood over pruned leaves quantity (`ratioWoodPruned_overLeaves_kgDM_ptree`). Households start pruning while crop residues become scarce due to herd consumption and trampling. It is done until there is no more tree vegetation or until agricultural plots are sown (thus becoming unavailable for livestock). Households first look for their own trees and those closer to their home, then, if they cannot prune them, they search for any tree with vegetation (without considering the plot ownership). Households will always target a tree that was already pruned the current year; if not possible, they target trees pruned the least recently (in terms of years), allowing other trees to rest as much as possible.

Table 35. Daily forage quantities targeted for Bovine and Small Ruminants

	Parameter	Unit	Bovine	Small ruminant
			(unpublished results, Assouma et al., submitted to Animal)	(unpublished results, Assouma et al., submitted to Animal)
Free-grazing	Q1	kgDM/TLU/day	3.0	2.0
Fattening	Q1	kgDM/TLU/day	3.0	2.0
	Q2a	kgDM/TLU/day	2.0	1.0
	Q2b	kgDM/TLU/day	3.0	2.0
	Nw*	week	12	-

* Nw is the number of weeks after the beginning of the fattening cycle before switching to increased feed quantities

Table 36. Daily forage quantities targeted for Equine

	Parameter	Unit	Equine
			(unpublished results, Assouma et al., submitted to Animal)
Draft animals	Q1	kgDM/TLU/day	3.0
	Q1	kgDM/TLU/day	3.0
	Q2a	kgDM/TLU/day	2.0

Fattening herds and draft animals also need concentrate feeds. As described in Figure 27, needs are updated in a similar way as for forage. Herd needs vary upon the fattening cycle for fattening management, and upon the cropping activities for draft animals. Concentrate feeds are purchased on the market and directly fed to herds. All types of biomasses and quantities ingested by the herd are recorded in a variable updated daily used to determine the daily quantity of excreta produced by the herd (see below).

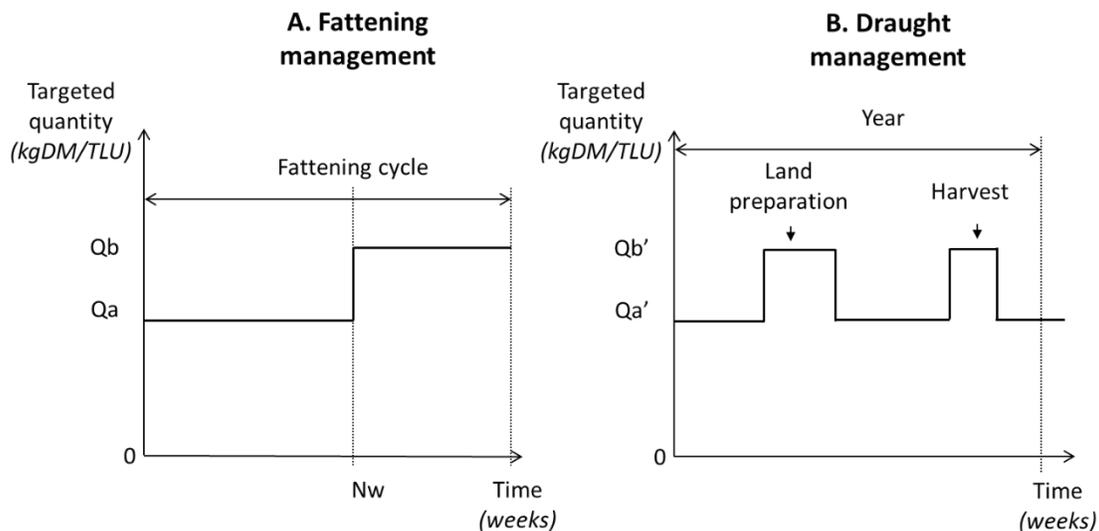


Figure 27. Concentrate feeds need for fattening herds and draft animals

A. Fattening herd; B. Draft animals; Nw is the number of weeks after the beginning of the fattening cycle before switching to increased feed quantities

3.10.4 Details on the biophysical processes

3.10.4.1 Processes relating to land plots

3.10.4.1.1 Tree production

Trees are represented in the model and located on land plots (i.e. `housingPlot` and `agriculturalPlot`). Modelled trees represent adult trees of the *Faidherbia albida* species. Indeed it is the dominant tree species in the studied landscape and is found highly palatable by the livestock. They are characterized by a “reverse” phenology, shedding its leaves at the peak of the rainy season, while being in full leaves throughout the dry season. The peak of production is reached in January-February (Depommier and Guérin, 1996). In the model, tree growth happens during the corresponding period (`tree_growth`) (see §3.10.2.1.2).

Climate does not influence tree production. It seems that late rainfalls impact fruit production (CTFT, 1988) but in the studied systems, fruit production is already very low due to high pruning intensity. Thus fruit production is not accounted for in the model.

Tree production depends on the pruning intensity over years (Depommier and Guérin, 1996) as pruning practices are very common in the studied systems. Table 37 shows the average production of the various tree products in kgDM/tree/year (leaves and wood) depending on the tree pruning intensity. The production lowers if the tree has been pruned the previous years.

Table 37. Modelled tree production (*Faidherbia albida*) according to different pruning intensities

Intensity index	Tree pruning intensity		Leaves production (kgDM/tree/year)	Dead wood production (kgDM/tree/year)
	Pruning year n-1?	Pruning year n-2?		
0	No	No	70	45 ⁽¹⁾
1	Yes	No	50	22
2	Yes	Yes	30	10

⁽¹⁾ from Jung (1969, p. 6), all other figures are based on Depommier and Guérin (1996)

Annually, at the end of the tree vegetative cycle (when tree vegetation is null), the **tree pruning intensity** is updated. As described in Figure 28, first, the trees that were not pruned during the tree vegetative cycle decrease in level of pruning intensity⁷; second, pruned trees increase in level of pruning intensity. The trees that were pruned three years in a row do not reach a higher level of pruning intensity but die (i.e. `prunedTrees` with an index of 2 are deleted from the system). As a new tree vegetative cycle may start, the variable `prunedTrees` is emptied.

As *Faidherbia albida* are legumes, they fix a certain quantity of nitrogen in the soil every year, as described by Jung (1969) (`Nfixed`) (Table 38).

⁷ This system was inspired from the Leslie matrix (Cushing and Yicang, 1994)

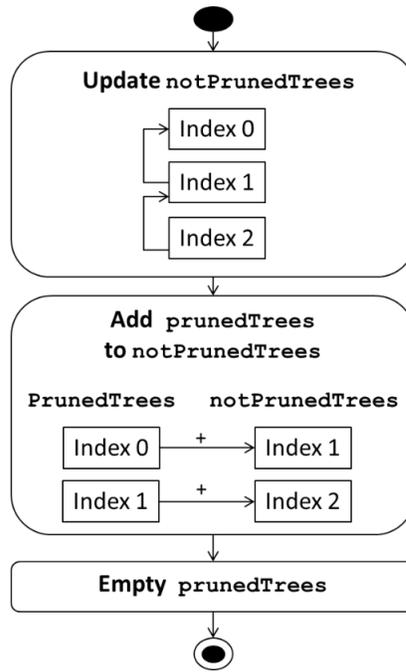


Figure 28. Update tree pruning intensity

Table 38. Parameters related to tree pruning and tree nitrogen fixation

Type	Parameters	Description	Value	Unit	Source
float	maxLeavesPrunedQuantity	Maximal quantity that can be pruned	40	kgDM/year/tree	(Depommier and Guérin, 1996)
float	ratioWoodPruned_overLeaves	Quantity of wood pruned over leaves quantity pruned	1.5	dimensionless	(Depommier and Guérin, 1996)
float	Nfixed	Quantity of nitrogen fixed per tree and per year in the soil	4	kgN/year/tree	(Jung, 1969) p10

3.10.4.1.2 Status evolution of agricultural plots

Within a year, agricultural plots change status according to biophysical processes and/or actionable processes undertaken by households. The plot status evolution scheme depends on whether the plot land use is a crop or natural vegetation; the land use is updated annually according to a fixed cropping plan. Crop plots are first sown, i.e. seeds are destocked according to sowing density; then crop grows if it is in the growing period; then when the crop cycle is over (e.g. 90 days after the beginning of growth for millet); crops can then be harvested: first for their agricultural products, second for their co-products; then plots are freed, i.e. the livestock can graze and be corralled on it (Figure 29a). Plot with natural vegetation are only dependent on internal processes: vegetation growth and decay (Figure 29b).

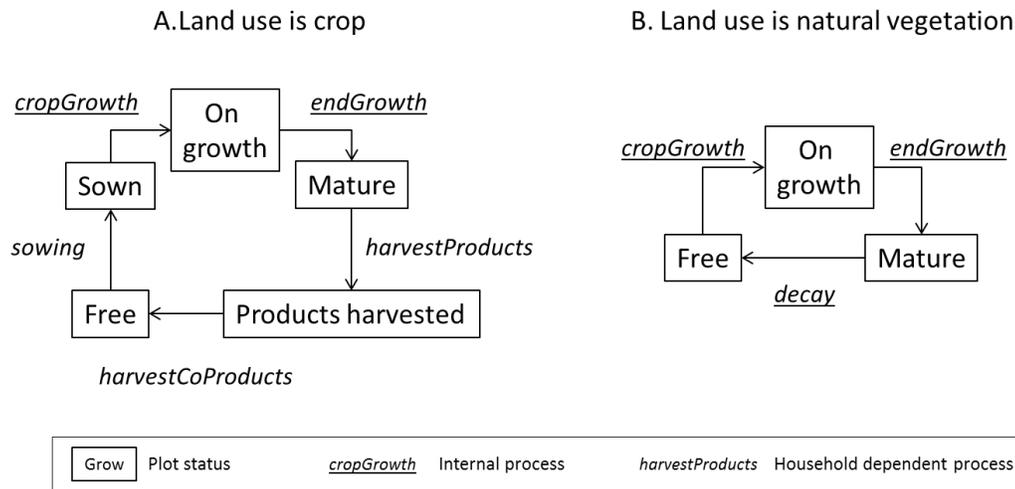


Figure 29. The various statuses for the agricultural plot agents

3.10.4.1.3 Yields computation in agricultural plots

As the representation of biophysical processes is simplified in the model, when the vegetation starts growing, total final yields of products and by-products are calculated (function of the predictive rainfall, a fixed parameter and the nitrogen available provided until sowing). During vegetation growth, it is assumed that the weekly biomass gain is linear for the cycle duration; for instance, the yield of the cropped agricultural plot1 is first calculated at 1 000kgDM/ha and its whole crop cycle lasts 10 weeks, the weekly production is 100kgDM/ha.

Table 39. Land use products, co-products and cycle duration

Land use	Product		Co-product		Cycle duration (days)	Source
	Name	Product fraction of total vegetation biomass (kgDM/kgDM)	Name	Co-product fraction of total vegetation biomass (kgDM/kgDM)		
Millet	Grain	0.3	Straw	0.7	90	(Affholder, 1997)
Groundnut	Grain	0.3	Hay	0.7	90	Expert knowledge
Fallow vegetation	Grass (graminae)	1.0	-	0	length rainy season + 10 days	Expert knowledge
Rangeland vegetation		1.0		0		

The duration of the vegetation growth cycle depends on its type, as described in Table 39. As also shown in the same table, each land use can produce a product and a co-product.

3.10.4.1.3.1 Vegetation yield

Crop and natural vegetation yields are dependent on rain and fertilization. As described in agricultural plot variables, land use outputs are distinguished in two types: product and co-product. Only crops produce co-products. The **yield** (Y) is calculated as described in Equation (4). The **water limited yield** (Y_w) is first calculated considering water as the only limitation to crop growth. Then the **nitrogen reduction factor** (NRF) is applied to Y_w.

The general equation for vegetation yield (Y in kgDM/ha) is as follows:

$$Y = Y_w \times NRF \quad (4)$$

Where **Y_w** is the water-limited yield (kgDM/ha) (specific for each land use)

NRF is the nitrogen reduction factor (dimensionless), Equation (8)

Groundnut response to rain and fertilization does not seem linear (Garcia, 2015). It is not taken into account in the model.

3.10.4.1.3.2 Water limited yield

For millet, the **water-limited yield** curve is determined using an empirical model, CELSIUS, acronym for Cereal and Legume crops Simulator Under changing Sahelian environment . CELSIUS is a dynamic crop model with a daily time-step calibrated with empirical data (Ricome et al., 2017). The model is based on the PYE model (Affholder et al., 2013) which integrates run-off, germination delays or plant destruction in case of drought and the delivery of soil nitrogen (Garcia, 2015). The water balance module used is the one built for the SARRA model (Affholder, 1997).

Figure 30 shows the resulting yields (for millet grain in 10³kgDM/ha) according to the annual rainfall considering rain as the only limitation for crop growth. Below 317mm of rain, there is no millet produced. Above 805mm, the curve levels off, i.e. the yield is maximal. From these results, the following equation is drawn to calculate millet yield under rain limitation:

$$Y_w \text{ millet} = 1.8608 \ln(x) - 8.6756$$

The same equation is used for Y_w natural vegetation (graminae).

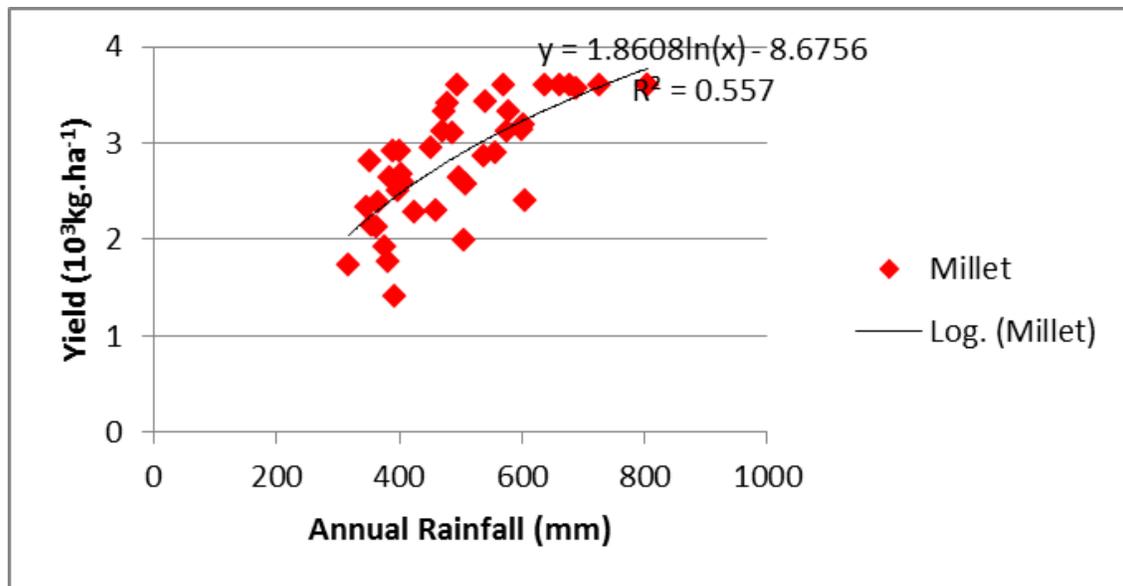


Figure 30. Water limited yield determination

3.10.4.1.3.3 Nitrogen reduction factor

3.10.4.1.3.3.1 Nitrogen available

In order to grow, natural and crop vegetation use nitrogen (N) drawn from the soil and external inputs applied. Only mineralized N can be used, called here **N available** (in kgN). In the model, mineralization is assumed to be undertaken during the whole year and, so, no specific time frame is determined. The most important is that every year, when yields are computed, only a certain quantity of N is mineralized which can be estimated as follows:

$$N_{available} = N_{soilStock} + inputN_{mineralized} + biologicalNitrogenFixation \quad (5)$$

Where **NsoilStock** is the N mineralized from the soil organic N stock (kgN)
inputNmineralized is the N available from the organic fertilizer N input (kgN), see [Equation \(6\)](#)
biologicalNitrogenFixation is the nitrogen fixed from the atmosphere (kgN)

The **soil stock of N available** (in kgN) depends on the previous inputs received. It is assumed that the annual quantity of N mineralized from the soil organic stock is higher in home fields than bush fields as home fields usually get more organic matter. The mineral nitrogen soil stock is estimated from 20 to 35 kgN/ha/year for home fields (fixed at 27.5 in the model) against 12 kgN/ha/year in bush fields ([Pieri, 1989](#)).

The quantity of **N mineralized from fertilization inputs** depends on the type of fertilizer and more especially on its nitrogen mineralization rate. Mineralization can take several years and thus there is a residual effect of fertilizers applied over years ([Freschet et al., 2008](#)).

$$inputN_{mineralized} = \sum_i N_{input_i} \times ratio_availability_i \quad (6)$$

Where **i** the type of fertilizer (mineral, manure, waste, dung, urine)
N input_i is the quantity of fertilizer **i** input (kgN)
ratio_mineralized_i is the fraction of N mineralized of the N fertilizer **i** input for x100 (%)

Mineralization rates are very dependent on the environment (sun, wind, temperature, soil quality). The lack of precise data imposed simplification in the model. [Table 40](#) shows the residual effect of organic fertilizer inputs due to nitrogen mineralization. For instance, only 60% of the nitrogen contained in manure is mineralized the first year of application and thus is available for the vegetation, the second year there is a residual effect corresponding to 40% of the input but from the 3rd year nothing remains.

Table 40. Percentage of N mineralized of organic fertilizer N applied (%)

Year of fertilization	Mineral	Manure	Household waste	Dung	Urine
1 st	100	60	40	60	100
2 nd	0	40	30	40	0
3 rd	0	0	30	0	0

Biological nitrogen fixation (**fixedN** in kgN/ha) is calculated as follows:

$$fixedN = N_{fixation} + symbioticN \quad (7)$$

Where **Nfixation** is the nitrogen fixed from the atmosphere by free-living micro-organisms (kgN/ha) ([Table 41](#))
symbioticN is the nitrogen fixed by legumes (crops and trees) (kgN/ha) ([Table 41](#))

Nitrogen fixation by free-living micro-organisms (**Nfixation**) is assumed to happen linearly during the rainy season.

Table 41. Nitrogen fixation parameters

Type	Parameters	Description	Value	Unit	Source
float	sympioticN	legume biological fixation	20	kgN/ha/year	(Defoer et al., 1998)
float	Nfixation	quantity of nitrogen fixed from the atmosphere (free-living micro-organisms fixation)	7.5	kgN/ha/year	(Delon et al., 2010)

3.10.4.1.3.3.2 Equation

The nitrogen reduction factor is only calculated right after the quantity of N available, i.e. once a year just before the vegetation starts its growth after the plot yield is calculated. According to Garcia (2015), the **nitrogen reduction factor** (dimensionless) is calculated as follows:

$$NRF = (N \text{ available} + \text{fixedN}) \times \frac{kp}{N_{\text{max}}} \quad (8)$$

Where **N available** is the quantity of nitrogen mineralized during the year and available for the vegetation (kgN/ha); see Equation (5)

fixedN is the nitrogen fixed from the atmosphere (kgN/ha); see Equation (7)

Kp is a loss coefficient

N max is the value above which fertilization is no more limiting the vegetation growth (kgN/ha)

$$\text{For millet } \frac{Kp}{N_{\text{max}}} = 0.0105 \quad \text{cf. CELSIUS model (Affholder et al., 2013)}$$

As yields cannot be indefinitely improved with nitrogen fertilizer application, in the model yields are limited above a fixed quantity of N available (kgN/ha). Conversely, a minimum yield is fixed even though no N available is low or null. Table 42 shows the bounds of the NRF under and above fixed quantities of N available.

Table 42. Minimum and maximum quantity of N input as a fertilizer and associated yields

Vegetation	Minimum quantity of N available (kgN/ha)	Minimum Nitrogen reduction factor (dimensionless)	Maximum quantity of N available (kgN/ha)	Maximum Nitrogen reduction factor (dimensionless)
millet	18	0.25	83	1
grass (graminae)	5	0.25	83	1
groundnut	0	1	0	1

3.10.4.1.3.4 Weeds

Fresh grass (weed), growing along with crops, are an important source of forage for livestock herds. It is assumed that, for proximity reasons, home fields are easier to maintain and weed than bush fields. Estimations of the weed yields among a population of home fields and bush fields are shown in Table 43. **Fresh grass yield** (Y_{fg}) is randomly drawn from a range based on these parameters assuming a normal distribution of the data. Fresh grass is only used for livestock feeding by grass cutting, and cleared at the end of harvest.

Free-grazing livestock herds fulfill their needs by grazing on agricultural plots; they (more precisely their herder component) sequentially choose agricultural plots where they will graze on the remaining biomass. The plot choice is determined first by its availability (e.g. not cultivated), then by the type and the quantity of biomass it holds. For instance, crop residues remaining in the field are preferred to grass. If possible, herds graze as a priority on the agricultural plots belonging to their owners. After grazing on a plot, herds move to another plot if they still have feeding needs. If required, households can destock straw or start pruning trees to feed them.

Table 44 shows the biomass preferences for grazing livestock (biomass preferences)

Table 44. Grazing livestock biomass preferences

Priority ranking	Biomass
1 st	Grass (rainy season)
2 st	Straw, hay
3 rd	Grass, leaves
4 th	Fresh grass

3.10.4.2.2 Excreta

Every day, the livestock herds excrete dung and urine. As described in Table 45, excreted quantities of dung (in kgN) depend on the quantity of nitrogen ingested the previous day, see Equation (9); the quantity of nitrogen excreted by urine depends on the dung excretion. Excreta deposits are proportional to the time spent on the plot. For instance, free-grazing herds spend a given time on their corral at night (by default, 10hours, then the herd will deposit 10/24 of its daily excreta on the corral). As for daytime (12/24 of their daily time and excretion), it is assumed that herds excrete proportionally to the quantity they ingest on a plot. For instance if a herd grazes only on one plot, it will excrete only on this plot but, in a case where the herd grazes on more than one plot in a day, the daily excretion is deposited accordingly to the quantity ingested on each plot over the total daily ingestion.

$$previousDayIngestedQuantity = \sum ingested\ quantity_i \times nitrogen\ quantity_i \quad (9)$$

Where **ingested quantity_i** is the ingested quantity for a given type of biomass during the previous day (in kgDM)

nitrogen quantity_i is the nitrogen content in kg per kgDM of the ingested biomass

Table 45. Livestock excretion rates

Livestock system	Rate of dung excreted w.r.t. ingested biomass (kgN excreted/kgN ingested)	Rate of urine excreted w.r.t. dung excreted (kgN excreted in urine/kgN excreted in dung)	Total rate of N excreted w.r.t. ingested (kgN/kgN)	Source
Grazing animal	0.59	0.53	0.90	(Grange, 2015; Wade, 2016)
Fattening animal	0.33	1.24	0.74	
Draft animals	0.33	1.24	0.74	

w.r.t. = with respect to

4 Chapitre 3 : Réorganisation du cycle de l'azote dans les SASP résultant d'une transition agraire

Ce chapitre se base sur l'article soumis à la revue *Agricultural Systems* en septembre 2017, actuellement en révisions mineures :

Grillot, M., Vayssières, J., Masse, D., à venir. Agent-based modelling as a time machine to assess nutrient cycling reorganization during past agrarian transitions in West Africa.

Cet article s'attache d'un point de vue thématique à l'analyse de la transition agraire dans le bassin arachidier avec notamment l'évolution paysagère menant à la diminution des surfaces de parcours et le développement de systèmes d'élevage intensifs. Le terme de transition agraire est entendu au sens de [Mazoyer et Roudart \(1997\)](#) comme une succession de systèmes distincts décrits afin de situer l'évolution des systèmes agraires.

Dans ce chapitre, les étapes clés de l'évolution des SASP du bassin arachidier ont été étudiées : période de base (1920), de développement de l'arachide (1960), de fortes sécheresses (1980) puis la période actuelle (2010) avec le développement de l'embouche. La transition agraire est particulièrement bien documentée pour la zone d'étude et les données d'entrée du modèle ont pu être définies à partir de la littérature.

En complément des différentes figures de ce chapitre, plusieurs graphiques synthétiques sont fournis en annexes :

- En [Annexe 4](#), la réorganisation des flux d'N au cours de la transition est présentée en détail pour chacun des compartiments agricoles (modèle conceptuel de la [Figure 4](#)).
- En [Annexe 5](#), les données relatives à la part des biomasses dans l'alimentation des troupeaux ainsi que leur origine (unité paysagère) sont fournies.
- En [Annexe 6](#), les mêmes informations que pour l'[Annexe 5](#) sont fournies mais en se centrant sur l'alimentation fourragère (donc sans les concentrés).
- En [Annexe 7](#), l'évolution de la contribution des différentes biomasses dans la fertilisation azotée des parcelles est présentée.

Agent-based modelling as a time machine to assess nutrient cycling reorganization during past agrarian transitions in West Africa

Myriam Grillot^{a,b*}, Jonathan Vayssières^{a,b}, Dominique Masse^{c,d},

^a CIRAD, UMR SELMET, Dakar, Sénégal ; SELMET, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France.

^b Dp PPZS, Pastoral Systems and Dry Lands –Institut de recherche sénégalais Hann BP2057, Dakar, Senegal

^c IRD, UMR Eco&Sols – F-34060 Montpellier, France

^d LMI IESOL, Centre ISRA IRD Bel Air BP1386, Dakar, Senegal

* Corresponding author. E-mail addresses: myriam.grillot@gmail.com (M. Grillot), jonathan.vayssieres@cirad.fr (J. Vayssières)

4.1 Abstract

Although in agronomy most model-based simulations explore future agro-ecosystems, we used a simulation model to explore past agro-ecosystems, which was particularly useful in a context where historical quantitative data on nutrient flows is lacking. The aim of this study was to assess the impact of an agrarian transition on the reorganization of nutrient cycles in agro-sylvo-pastoral systems (ASPS) in West Africa. The model was an agent-based model called TERROIR (TERRoir level Organic matter Interactions and Recycling model) that analyzes nutrient cycles at three levels of organization: plot, household, and landscape. Simulated scenarios were defined based on the agrarian transition that occurred in the 1920-2010 period in the groundnut basin of Senegal, a rapid transition caused by strong population growth, high climate variability and fluctuating cash crop markets. The main trends of the simulated agrarian transition are expansion of croplands onto rangelands and a shift from subsistence to market oriented farming systems, resulting in a shift from a livestock feeding system based on free grazing to a system based on the increasing use of feed concentrates and crop residues after harvest. The transition led to an intensification of nitrogen flows and to reduced nitrogen use efficiency. It is due to the accumulation of nutrients in the area near the homestead and incomplete return of nutrients to cultivated plots. Two major properties appear to be outlasting the transition: (i) independence towards external inputs, based on crop-livestock integration, i.e. high biomass and nutrient recycling within the system; (ii) spatial heterogeneity due to nutrient transfers from peripheral land units to core land units, mainly through livestock. We argue that the persistence of these two emerging properties is a key pattern of past trajectories that may be used to make assumptions on and explore future ASPS trajectories.

Keywords: agrarian transition; agent-based model; organic matter management; crop-livestock integration; nutrient spatial transfers; Senegal

4.2 Highlights

- Agent-based models can be used to explore past agro-sylvo-pastoral systems in West Africa
- The agrarian transition led to intensification of nitrogen flows and reduced efficiency
- Nitrogen accumulated in the homestead areas with incomplete return to cultivated areas
- Independence and spatial heterogeneity outlasted the agro-sylvo-pastoral transition

4.3 Introduction

Traditional agro-sylvo-pastoral systems (ASPS) in the rural sahelo-soudanese zones of West Africa are widely described in the literature (Dugué, 1998; Powell et al., 2004). Soils are inherently poor and farming systems are low input systems. The limiting factors to the productivity of these systems are biomass and nutrients (Affholder et al., 2013). ASPS are based on crop and livestock integration; crop residues and fodder from non-cultivated areas are used to feed animals; animal excreta through free grazing and night corralling are used to fertilize crops. Livestock are consequently key drivers of nutrient recycling and of the spatial transfers that are essential to maintain soil fertility (Dugué, 1998). Under resource scarcity, the main household strategy is to concentrate organic matter in fields near the homestead, in order to ensure food security. The spatial heterogeneity of nutrient inputs and nutrient availability for crops is consequently high between home fields and bush fields (Manlay et al., 2004a).

The population growth rate in West Africa reached 2.7% between 2010 and 2015, which is particularly high compared to the world growth rate (+1.2%) (United Nations, 2015). The resulting increase in the demand for food led to the rapid expansion of croplands onto rangelands (Achard and Banoïn, 2003; Dugué, 1998). In addition, farming systems were impacted by crop market variability, such as the cotton crisis in Mali and Burkina Faso in the 2000s (Falconnier et al., 2015) and the groundnut crisis in Senegal in the 1980s (Lericollais, 1999). In this context, ASPS were subject to constant change, with their productive resources being reorganized in space and time. For instance, today, crop residues are used for mulching or for feeding in-barn cattle instead of being available for free grazing livestock (Andrieu et al., 2015; Tiftonnell et al., 2015). Crop expansion onto rangelands strongly reduced the land available for livestock and consequently, livestock mobility within the village landscape, particularly during the cropping season (Dugué, 1998). Consequently, the future functioning and sustainability of traditional ASPS based on crop-livestock integration and spatial heterogeneity are called into question (Lericollais and Faye, 1994; Vayssières et al., 2015).

Many studies have been conducted to understand the functioning of the systems in terms of biomass and nutrient cycling. These studies had different objectives and used different methodologies, for example, to assess recycling intensity and crop-livestock integration, Ecological Network Analysis was used (Rufino et al., 2009b; Stark et al., 2016), spatial heterogeneity was evaluated using a system gate balance (Manlay et al., 2004a; Schlecht and Hiernaux, 2004), and biomass recycling was quantified using a stock-flow model (Diarisso et al., 2015). However, the studies of “functioning” did not assess changes in ASPS properties such as crop-livestock integration and spatial heterogeneity because they did not include changes in the landscape and in farming systems.

In contrast, agrarian transition approaches aim to assess changes in land use, changes in farming systems and their drivers in order to foresee possible future agricultural dynamics (Matthews et al., 2007; Ryschawy et al., 2013). These studies focus on the range of successive farming systems that appear in a given region and period in response to a changing environment (Mazoyer and Roudart, 1997). Studies of “transition” focus on land use policies, see Castella et al. (2005) and Le et al. (2010) in Vietnam, decision making affecting land use, see Jahel et al. (2016) in Burkina Faso, or describe farming system trajectories (see Falconnier et al., 2015; Saqalli et al., 2013; Vall et al., 2017). However these studies generally show little or no interest in biomass and nutrient recycling. Knowledge is thus lacking on the consequences of effective changes in land use and of changes in farming systems on nutrient cycles, particularly in West Africa.

This paper is based on the concept of agrarian transition used to study the agricultural transformations in a region as a succession of distinct systems constituting as many steps of an historical period (Mazoyer and Roudart, 1997). The objective of this paper is to show how a modelling approach can be used to assess the impact of an agrarian transition on the reorganization of nutrient cycles in ASPS. It presents a typical application of a dynamic “functioning model”, the TERROIR agent-based model, which is fully described and evaluated in Grillot et al. (forthcoming). The model represents and spatializes the daily interactions between farming activities in terms of biomass and nitrogen flows and calculates indicators for ASPS structure, functioning and performances.

Seven scenarios were built to assess three trajectories of village terroirs and the corresponding agrarian transition typically encountered in the groundnut basin of Senegal. Each simulated scenario represents the state of an ASPS between 1920 and 2010 for the three trajectories studied. Scenarios were based on data collected in the last century by researchers of the Niakhar Population and Health Observatory, which is one of the oldest in Africa (Delaunay et al., 2013).

4.4 Materials and methods

4.4.1 The TERROIR agent-based model

The TERROIR model (TERRoir level Organic matter Interactions and Recycling model) was built to simulate the organization of biomass and nutrient flows in a village during a given year. Biomass and nutrient flows are transfers that occur in space and over time between two types of functional compartments: (i) compartments related to **farming activities**, i.e. soil and plants, livestock, humans, manure heap and granary; (ii) compartments related to **land units**, i.e. homestead area, home fields, bush fields and rangelands. The model distinguishes **households** as the main agent for decision-making, **livestock** as conveyers of organic matter, **land plot** as the main spatial unit and biomass **stock** dynamics. The full model description and evaluation is given in Grillot et al. (forthcoming). The purpose of the model is to focus on activities that produce biomass flows that enhance farming activities, these being the main activities in the ASPS studied (Lericollais, 1999; Powell et al., 2004). The model uses general guide rules, such as priority fertilization of home fields, livestock paddocking on the owner's plot, etc. Quantities are determined according to adjustable thresholds, e.g. family needs for the amount of land under millet, livestock needs for forage storage. The rules and thresholds are based on previous studies (Audouin et al., 2015; Lericollais, 1999). Although the model does not capture all the household strategies (off-farm activities, human migration, etc.), indirect effects are included. For instance, economic constraints are represented by inputs and workforce availability.

Main input data concern (i) landscape structure, i.e. the share of each land unit, (ii) farming system diversity, i.e. the share of each household type, and (iii) climate (§ 4.4.3). The time step is a day and each simulation runs for five years, after which the output indicators are stabilized. Each simulation is repeated eight times due to the stochasticity of the model. Simulation outputs describe the structure, functioning and performance of the system for one year, i.e. the last year of the simulation run.

The main functioning and performance output indicators are based on nitrogen flows circulating between the farming activities and land units (Table 46), as the ASPS is compartmented according to the two conceptual models described above. These indicators were fully described and implemented by Rufino et al. (2009b), Stark et al. (2016) and Vayssières et al. (2011). They are calculated by the model at the three organizational levels, landscape, household and plot. All the indicators are based on apparent flows, i.e. those resulting from household activities. The only exception is for the calculation of the full balance, which includes invisible flows corresponding to atmospheric deposition, fixation by legumes and losses to the environment (leaching, run-off and gaseous emissions). Livestock versus human-driven flows are also distinguished; livestock-driven flows are direct intake and outtake by livestock from and to plots while human-driven flows are all other flows (manure management, crop harvest, home consumption, etc.). This distinction makes it possible to calculate the contribution of livestock to total spatial transfers.

Table 46. The output indicators chosen to describe the functioning and performances of the village terroir in this paper

Indicator	Unit	Level	Formula	
Functioning (ecological network analysis indicators)	total inflow	kgN.year-1.ha-1	L, H	$TIN = \frac{\sum_{i=1}^n z_{i0}}{\text{unit area}}$
	total system through flows	kgN.year-1.ha-1	L, H	$TST = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\text{unit area}}$
	internal circulation rate	dimensionless	L, H	$ICR = \frac{\sum_{i=1}^{j=n} f_{ij}}{TST}$
	independence from external inputs	dimensionless	L, H	$IND = 1 - \frac{TIN}{TST}$
Performance (system gate indicators)	productivity (total outflows)	kgN.year-1	L, H, P	$TOUT = \sum_{i=1}^n z_{oi}$
	Balance	kgN.year-1.ha-1	L, LU, H, P	$\frac{\text{inflows} - \text{outflows}}{\text{unit area}}$
	Efficiency	dimensionless	L, H, P	outflows/inflows

z_{i0} is the total inflow from the external environment into each compartment

f_{ij} is a flow from compartment j to compartment i .

T_i is the total inflow for compartment i .

Unit area is an area in hectares that depends on the organizational level considered: landscape level is village area; household level is the area cultivated by the household; plot level is plot area (0.25 ha).

Level: L = landscape, H = household, P = plot, LU = land unit

4.4.2 Case study in the Senegalese groundnut basin

The study area is the Senegalese groundnut basin, an agricultural area located in the center of Senegal. The Population and Health Surveillance System was established in 1960 to collect population data in the core of the study area, i.e. the Niakhar rural area. This observatory is one of the oldest in Africa. Surveys on many side topics such as agriculture were conducted, providing detailed and historical data for the area (Lericollais, 1999; Pélissier, 1966).

The climate is typically Sahelian-Sudanian, with an average of 590 ±170 mm rainfall for the period 1920-2010, according to measurements made at the Bambey meteorological station (Figure 32). The study period was especially marked by droughts in the 1980s, with rainfall dropping to a low of 318 mm in 1983 (Figure 32, Vischel et al. (2015)). Due to limited rainfall, dry cereals (millet) are the main crop cultivated in the area, and forms the basis of the family food consumption. Groundnuts are produced as a cash crop. Groundnut production peaked in the 1960s and declined in the 1980s.

Like elsewhere in Senegal, population growth is about 3% per year (Delaunay et al., 2013). The population is mainly Sereer (97%), an ethnic group known for its mixed crop and livestock farming system. Generally, livestock is managed extensively, free grazing during the day and paddocked at night in order to concentrate their excreta (dung and urine) and fertilize specific fields (Lericollais, 1999).

By the end of the 1960s, animal traction had become widespread, enabling households to farm larger areas (Lericollais, 1999). The extent of rangeland and the number of fallow plots decreased by 80% between 1965 and

1985 due to the expansion of millet and groundnut cropping (+8% and +11% hectares cultivated, respectively) (Lericollais and Milleville, 1993). In the 1980s, farming systems were constrained by drought and the declining groundnut market. In parallel, urbanization increased by about 4%, with a corresponding increase in the need for human food and livestock products (Ouedraogo, 2007). This context led to more diverse activities among villages as some villages chose more intensive livestock management targeting meat markets (Sow et al., 2004). Mainly based on imports of feed concentrate, these livestock systems enabled a high carrying capacity of up to 1.5 TLU⁸/ha while average extensive systems only allowed about 0.5 TLU/ha (Audouin et al., 2015; Lericollais, 1999; Lericollais and Faye, 1994).

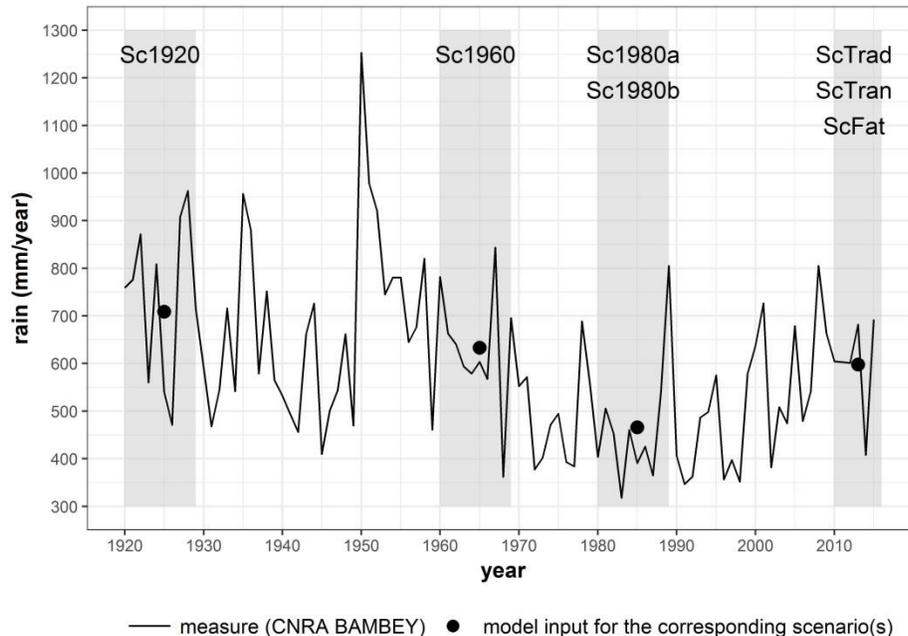


Figure 32. Measured rainfall variability and data used as input data for each simulated scenario (Sc1920, Sc1960, Sc1980a, Sc1980b, ScTrad, ScTran, ScFat; see description of the scenarios in §4.4.3)

4.4.3 Scenario and trajectory construction

This paper is based on the concept of agrarian transition used to study the agricultural transformations in a region as a succession of distinct systems constituting as many steps of an historical period (Mazoyer and Roudart, 1997). The TERROIR model does not intend to simulate long term dynamics such as crop expansion and population growth but rather the different steps of a system. Thus, simulating the 1920-2010 period required sequencing it in distinct scenarios corresponding to specific initial conditions for the simulation model. Four sub-periods emphasizing the main factors that influenced the agrarian transition were chosen: the **1920s** as the reference period, with low population density and little interaction with external markets; the **1960s** as a prosperous period for groundnut cash crop; the **1980s** when the systems were highly constrained by drought and the decline in the groundnut market; the **present decade** with new open markets and increasing demand for animal products leading to more diverse farming strategies.

For the present decade, three kinds of villages are distinguished in this paper to represent the observed diversity of farming strategies (Audouin et al., 2015): (i) **traditional** villages that continue the traditional system with little land under cash crops but with fallow areas to for their extensive herds in the cropping season (scenario ScTrad); (ii) **transhumant** villages aiming at crop and livestock markets but still attached to extensive livestock systems, thus practicing transhumance during the cropping season (scenario ScTran); (iii) **fattening** villages with most interest in

⁸ TLU: Tropical Livestock Unit. 1 TLU = 250 kg live weight.

meat markets, i.e. in producing fattened cattle (intensive livestock system) and groundnuts (scenario ScFat). Three trajectories describing the changes undergone by each type of village between the 1920s and 2010 are considered. Based on the assumption that differentiation between villages began in the 1980s (Dubois, 1974; Lericollais, 1999; Pélissier, 1966), the three trajectories use the same scenario for 1920s (Sc1920) and 1960s (Sc1960). Two scenarios were built for the 1980s; one based on the changes undergone by the traditional and transhumant villages (Sc1980a) and the other moving towards market-oriented strategies, i.e. towards fattening villages (Sc1980b).

Three main parameters were used as model inputs for each scenario. The parameters were fixed according to observations and surveys in the study area. First, **landscape structure** was required, i.e. the share of each land unit represented in the model (homestead areas, home fields, bush fields and rangelands). The landscape structure was defined based on field observations (Audouin et al., 2015; Lericollais, 1999) and remote sensing based on satellite photos (Corona, 1968), aerial pictures (JICA, 1989) and satellite images (Spot7, 2016) (Ndiaye et al., 2016). Second, data on **farming systems diversity** were represented in the model by the household typology, which was based on individual data collected on the household structure and farming activities during household surveys conducted by researchers of the Niakhar observatory in the 1960s (Lericollais, 1999; Lericollais and Ramond, 1970), in the 1980s (Lericollais, 1999) and in the beginning of the 2010s (Audouin et al., 2015). Four types of households are distinguished based on their main farming activities, depending on whether the household is subsistence or market oriented and livestock or crop oriented: **livestock-subsistence-oriented** (LS), **crop-subsistence-oriented** (CS), **livestock-market-oriented** (LM), **crop-market-oriented** (CM). Regardless of their orientation, all the households own animals and grow crops, only the degree of involvement in each activity varies. The share of each household type and their structure in the 1920s were adjusted assuming a linear evolution between the 1920s and 1980s. The scenarios were cross-validated with village level data from a variety of sources (Delaunay et al., 2006; Dubois, 1974; Lericollais, 1999). Third, **climate** has been recorded by the Bambey meteorological station since the 1920s and the average annual rainfall for each period was used as input data for each scenario (Figure 32).

4.5 Agro-sylvo-pastoral system structure and simulation results

This section describes the simulated changes in the ASPS between 1920s and the present decade at landscape, household and plot levels. The first part describes changes in model input parameters as the result of scenario building and the resulting changes in the structure of the ASPS, which are based on aggregation at the village terroir level of the input data provided at household level. The following parts describe the results of the simulations. They describe the functioning (recycling and spatial transfers) and performance indicators. The simulations were used to compare the traditional (in blue in Figure 36, Figure 37 and Figure 38), transhumant (in yellow) and fattening (in grey) trajectories, corresponding to the three village types.

Evolution from 1920s to 2010s for each trajectory is given as a percentage (and not in percentage points) with the direction of the evolution (“+” for an increase and “–” for a decrease). We used one-way ANOVA with post hoc Tukey tests to evaluate differences between the different scenarios at village landscape level and two-way ANOVA with post hoc Tukey tests to evaluate differences between household types and scenarios.

4.5.1 Changes in the agro-ecosystem structure and in household diversity in the trajectories

The following parameters resulted from scenario building and were used as inputs in the model for the corresponding simulations. In the three simulated trajectories, cropland area increases until it reaches nearly the total village area (625 hectares) (Figure 33). The share of home fields versus bush fields increases from 30% in the 1920s to about 50% in the present decade. Before the 1960s, crop expansion onto rangelands enables an increasing number of households with no decrease in the cultivated area available to each household. Rangelands can be considered as a non-limiting resource in the 1920s, as they occupy most of the village area and human and livestock densities are low. This is no longer the case in the present decade, when rangelands account for less than 10% of the total area of the villages and human and livestock densities are higher.

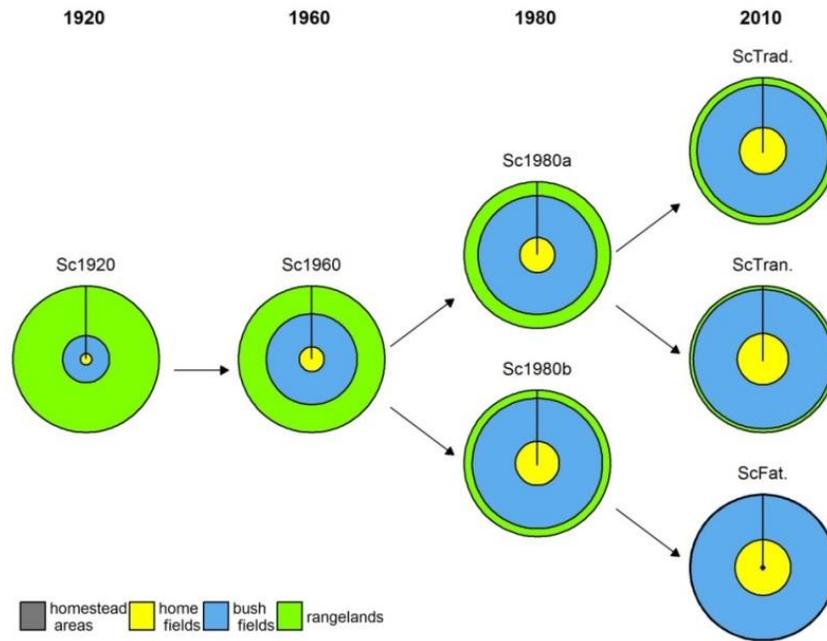


Figure 33. Landscape structure and share of land units (from the center outwards: homestead areas, home fields, bush fields, rangelands) in the 7 scenarios covering the 3 trajectories studied (traditional, transhumant and fattening)

In the 1920s, the simulated villages are only occupied by subsistent-oriented households (Figure 34). By the 1960s, during peak production of groundnuts as a cash crop, 20% of the households are crop-market-oriented (CM). In Sc1980a leading to traditional (ScTrad) and transhumant (ScTran) villages, this share decreases in favor of crop-subsistence-oriented households. In Sc1980b, leading to fattening (ScFat) villages, the share of market-oriented households is increased by the emergence of livestock-market-oriented households (LM).

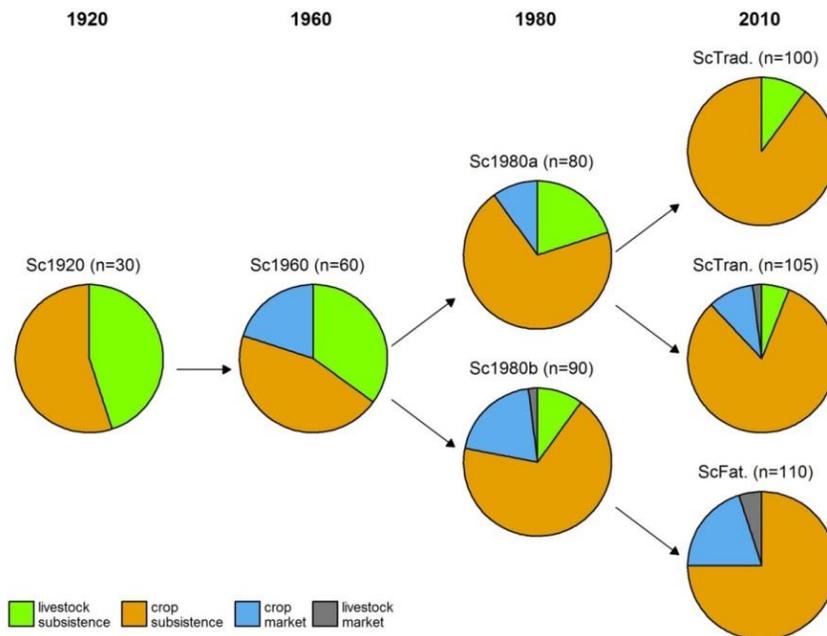


Figure 34. Farming diversity and share of household types (livestock subsistence, crop-subsistence, livestock market, crop market) in the 7 scenarios covering the 3 trajectories studied

For the three trajectories, the number of households triples between the 1920s and the present decade. Human population increases about 4-fold in 90 years. The population density is 47 inhabitants/km² in 1920s and reaches

181, 201, and 227 inhabitants/km² in the present decade in the traditional, transhumant and fattening trajectories, respectively. The number of family members increases, particularly in market-oriented households (more than +1%/year for LM and CM types). In parallel, the number of heads of livestock also increases at an annual growth rate of around +3%/year between the 1920s and the 1980s. After the 1980s, the annual growth rate decreased progressively but remained higher in the fattening trajectory (+1.77%/year) than in the two other trajectory (+0.58%/year). The village livestock stocking rate (in TLU/ha) increases from 0.13 in the 1920s to 0.73-0.90 in 1980s and reaches, 0.85, 0.87 and 1.53 in the 2010s in the traditional, transhumant and fattening villages, respectively.

The changes in farming systems diversity results in a modification in land use in the farming area (i.e. home fields and bush fields) (Figure 34). In the 1920s, the farming area is dominated by fallows (54%), along with millet crops (46%). The share of fallows in the farming area then decreases in favor of groundnut cultivation. Groundnut land use reaches a peak at 29% of the farming area in the 1960s before decreasing until the present decade. Land use is similar in the three trajectories in the 2010s (chi-square pvalue = 0.10), land cropped with millet accounts for 64±1% of the farming area, groundnuts for 17±1% and fallows for 18±3%, depending on the trajectory.

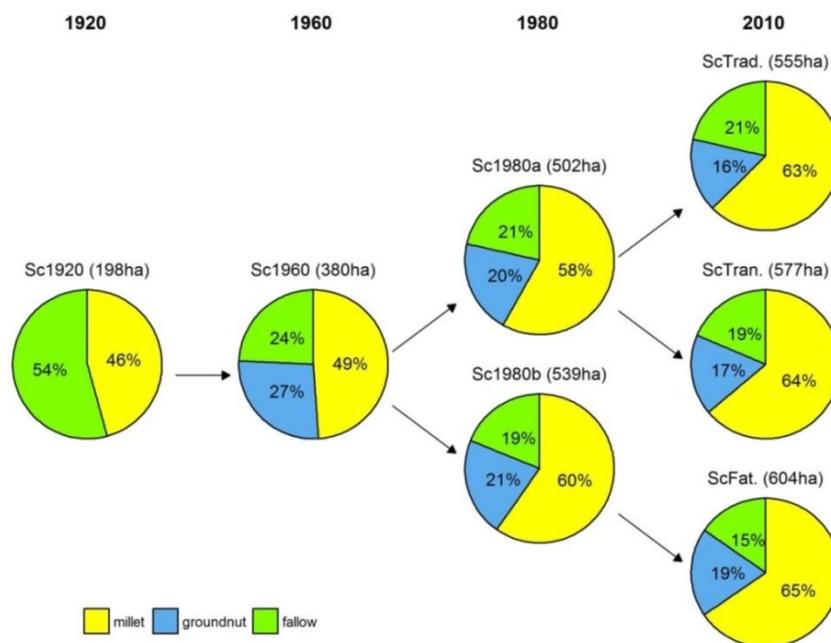


Figure 35. Proportion of land use types in the cultivated areas (home fields and bush fields) in the 7 scenarios covering the 3 trajectories studied

4.5.2 Agro-sylvo-pastoral system functioning: ecological network indicators

An intensification of nitrogen flows is simulated in all three simulated trajectories; at landscape level, TST is 10, 12 and 15 times higher in the present decade than in the 1920s in the traditional, transhumant and fattening trajectories, respectively (Figure 36.A). Market-oriented households and particularly LM have a high tendency to produce more and more flows with a faster growth rate than the other types of households: +1.4% per year for LM versus an average of +0.6% per year for the other household types between the 1980s and 2010s.

Although between the 1920s and the 2010s, the recycling intensity (ICR) decreases by 18% to 32% depending on the trajectory, this indicator is still high, with more than 67% of the flows circulating within the landscape still being internal flows (Figure 36.B). The ICR increases by 5% between 1980 and 2010 in the traditional trajectory, whereas it decreases by 4% and 8% in the transhumant and fattening trajectories, respectively. In 2010, traditional villages have a higher rate of recycling than transhumant and fattening villages. At household level, in the present decade and in all trajectories, market-oriented households are less integrated than the other types (average ICR of 0.48±0.07 for LM and CM versus 0.69±0.08 for LS and CS households).

Similarly, the level of independence (IND) decreases over the years by 14% to 25% but remains above 0.74 (Figure 36.C). In the 1920s, only 2% of the circulating flows originate from the exterior of the village while flows reach 15%, 21% and 26% of the circulating flows in the 2010s in traditional, transhumant and fattening villages, respectively. Similarly, at household level, there is a decrease in independence in all household types. In the present decade, market-oriented households (0.60 ± 0.07) are less independent than subsistence-oriented households (0.76 ± 0.07).

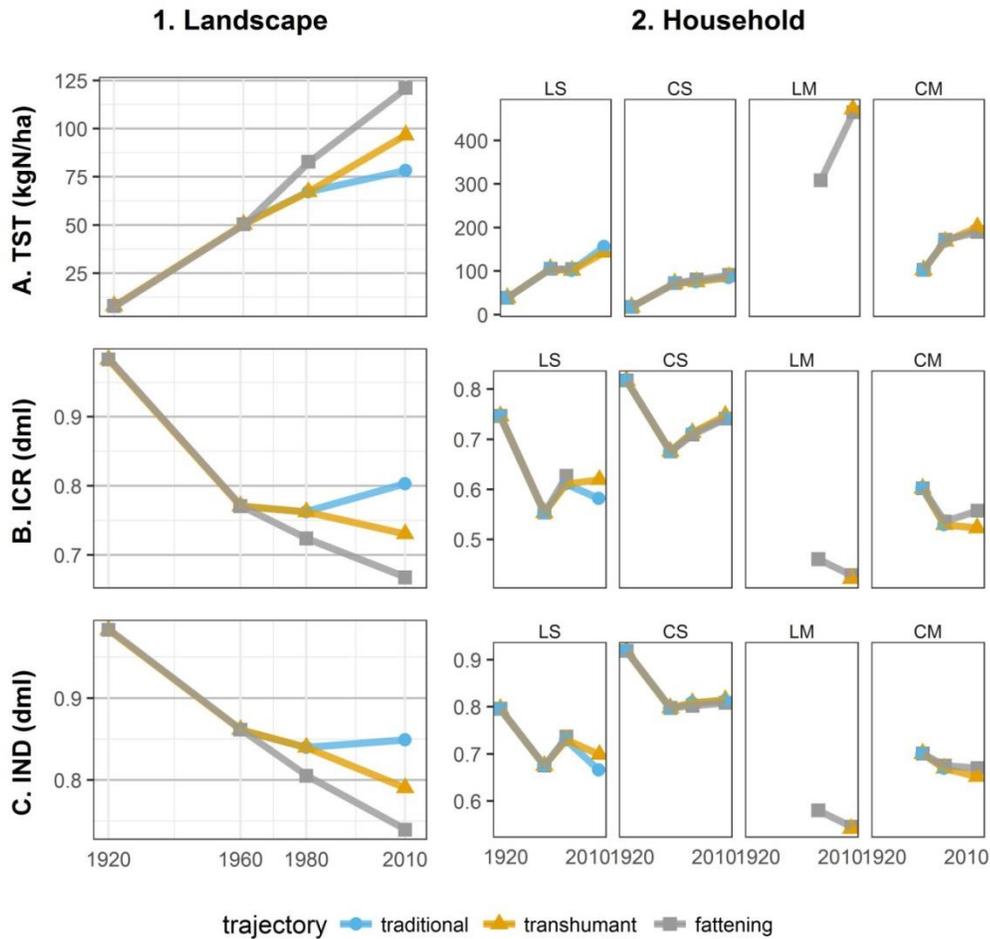


Figure 36. Simulated functioning indicators describing crop-livestock integration at village and household levels

- A. Total system through flows (kgN/ha);
- B. Internal circulation rate (dimensionless);
- C. Independence versus external inputs (dimensionless)
- 1. Data at landscape level
- 2. Data per household for each type (LS = livestock-subsistence-oriented, CS = crop-subsistence-oriented, LM = livestock-market-oriented, CM = crop-market-oriented)

4.5.3 Agro-sylvo-pastoral system functioning: spatial nutrient transfers

In all three trajectories, livestock intake and outtake represent $50\pm 7\%$ of the total spatial transfers, i.e. nitrogen flows between land units (data not shown). In the 1920s, livestock intake mainly originates from bush fields (67% of the total livestock intake) (Figure 37.A). Between the 1920s and 2010s, the contribution of bush fields to livestock total intake decreases over the years most rapidly between the 1920s and the 1960s (-65%). No forage and feed from the homestead areas were recorded in the 1920s, however, in the 1960s, forage and feed accounted for 34% of the total intake. Between the 1960s and the 2010s, the contribution of homestead areas to total intake increases by +42%, +98% and +133% in the traditional, transhumant and fattening trajectories, respectively. Between 1920 and 2010, home fields contribute $13\pm 2\%$ of the total intake in all the trajectories while rangelands contribute $13\pm 10\%$, with a peak (32%) in the 1960s.

Livestock outtakes show the same trends as livestock intakes (Figure 37.B). Bush fields receive a decreasing share of total outtake, particularly between the 1920s and the 1960s with a decrease of -48%; and homestead areas receive an increasing share of the total outtake of +16%, +61% and +94% between the 1960s and the 2010s in the traditional, transhumant and fattening trajectories, respectively. In all the trajectories and counting the whole period, home fields receive about $25\pm 5\%$ of the total outtake while rangelands receive $4\pm 4\%$.

Simulation results underline spatial transfers driven by livestock in favor of home fields and bush fields; in all trajectories, livestock excrete more than they ingest in the home fields ($+6.7\pm 4.1$ kgN/ha) and bush fields ($+0.2\pm 1.2$ kgN/ha), as they are usually paddocked there at night. However, accumulation of N in home and bush fields thanks to livestock-driven flows disappears when human-driven flows are also taken into account (Figure 37.C). Apparent balances in the homestead areas are positive and increase rapidly over the period 1920-2010; the highest level is reached in fattening villages in the present decade (2 382 kgN/ha). In all three trajectories, balances are positive in home fields and negative in bush fields and rangelands.

In all three trajectories, the balances in the home fields increase by an average of $+1.8\pm 0.2\%$ /year between 1920 and 2010; however this increase is discontinuous because in the 1980s, it again drops to reach values that are not significantly different from those in the 1920s (pvalue <0.05). Balances for bush fields and rangelands decrease over the years by an average of $-2.2\pm 0.1\%$ /year and $3.6\pm 0.5\%$ /year, respectively, between 1920 and 2010. Rangeland balances do not differ significantly (pvalue <0.05) between 1960 and 2010 in the fattening trajectory (-7.3 ± 1.1 kgN/ha) nor between the traditional and transhumant trajectory in 2010 (-5.9 ± 3.2 kgN/ha).

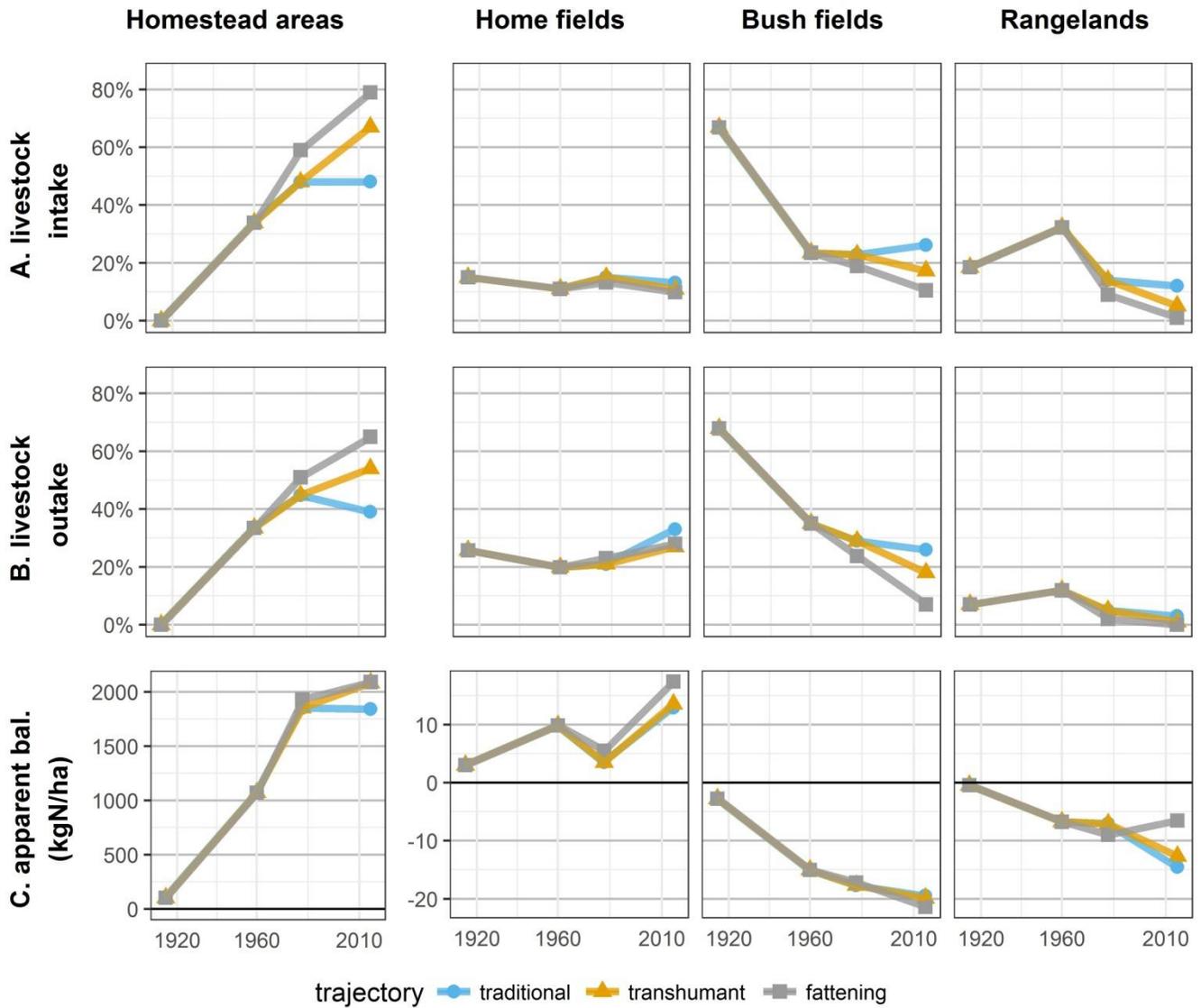


Figure 37. Simulated functioning indicators describing spatial heterogeneity at land unit level

- A. ratio of livestock total intake (forage, feed concentrates) in the land unit to total intake (homestead areas includes feed purchased on outside markets)
- B. ratio of livestock total outtake (dung, urine) in the land unit to total outtake
- C. apparent balance (kgN/ha of the land unit)

4.5.4 Agro-sylvo-pastoral system performances

In the three trajectories and at landscape, household and plot levels, productivity increases between 1920 and 2010 (Figure 38.A). At landscape level, exports of crop and meat reach 3.6, 5.8 and 8.7 kgN/ha in the present decade in the traditional, transhumant and fattening villages, respectively. Between 1920 and 2010, livestock-market-oriented households are the most productive (55.37 ± 1.4 kgN/ha), with a maximum of 56.4 kgN/ha exported in 2010, as opposed to subsistence-oriented households that export 12.8 ± 8.0 kgN/ha over the whole study period. At plot level, production follows the same trend as at landscape level, i.e. there is an increase in average nitrogen exports of $+2.4 \pm 0.05\%$ /year between 1920 and 2010 in all three trajectories.

At landscape level, apparent balances are positive in all trajectories (Figure 38.B, solid lines). Apparent balances increase between 1920 and 2010 by +4.7, +5.3, +5.9%/year in the traditional, transhumant and fattening trajectories, respectively. At household level, LM households have higher balances (158.4 ± 2.3 kgN/ha) than the other types of households (26.8 ± 15.7 kgN/ha). At plot level, apparent balances are negative for the whole study period; they decrease by 15% between the 1920s and the 1980s then stabilize until the present decade.

At village level, full balances are positive (Figure 38.B, dotted lines). Like apparent balances, full balances increase between 1920 and 2010 but with lower rates of +0.3, +0.6, +0.9%/year in the traditional, transhumant and fattening trajectories, respectively. Full balances are higher than apparent balances in all trajectories except for the transhumant and fattening ones in the current decade. LM households have the highest full balances (37.1 ± 0.7 kgN/ha) of the three trajectories compared to the other households (10.2 ± 4.8 kgN/ha). At plot level, full balances follow the same trend as apparent balances even though they remain higher ($+6.5 \pm 0.7$ kgN/ha); i.e. full balances decrease by 15% between the 1920s and the 1980s in all three trajectories and then by -1.1, 0.9, 0.3%/year in the traditional, transhumant and fattening trajectories, respectively.

In all three trajectories, the efficiency of the nitrogen use at landscape level decreases by -53, -56 and -58% between the 1960s and the 2010s in the traditional, transhumant and fattening trajectories, respectively (Figure 38.C). Efficiency is null in the 1920s as no exports are simulated. Subsistence-oriented households are more efficient than market-oriented households (0.5 ± 0.3 against 0.3 ± 0.1). The average plot efficiency is above 1.25 in all trajectories throughout the study period. In the traditional and transhumant trajectories, plot efficiency increases between the 1920s and the 1980s (+52%) and then decreases until the 2010s by -9 and -13% respectively. In the fattening trajectory, plot efficiency also increases between the 1920s and the 1980s (+37%) then decreases by 10% until the 2010s.

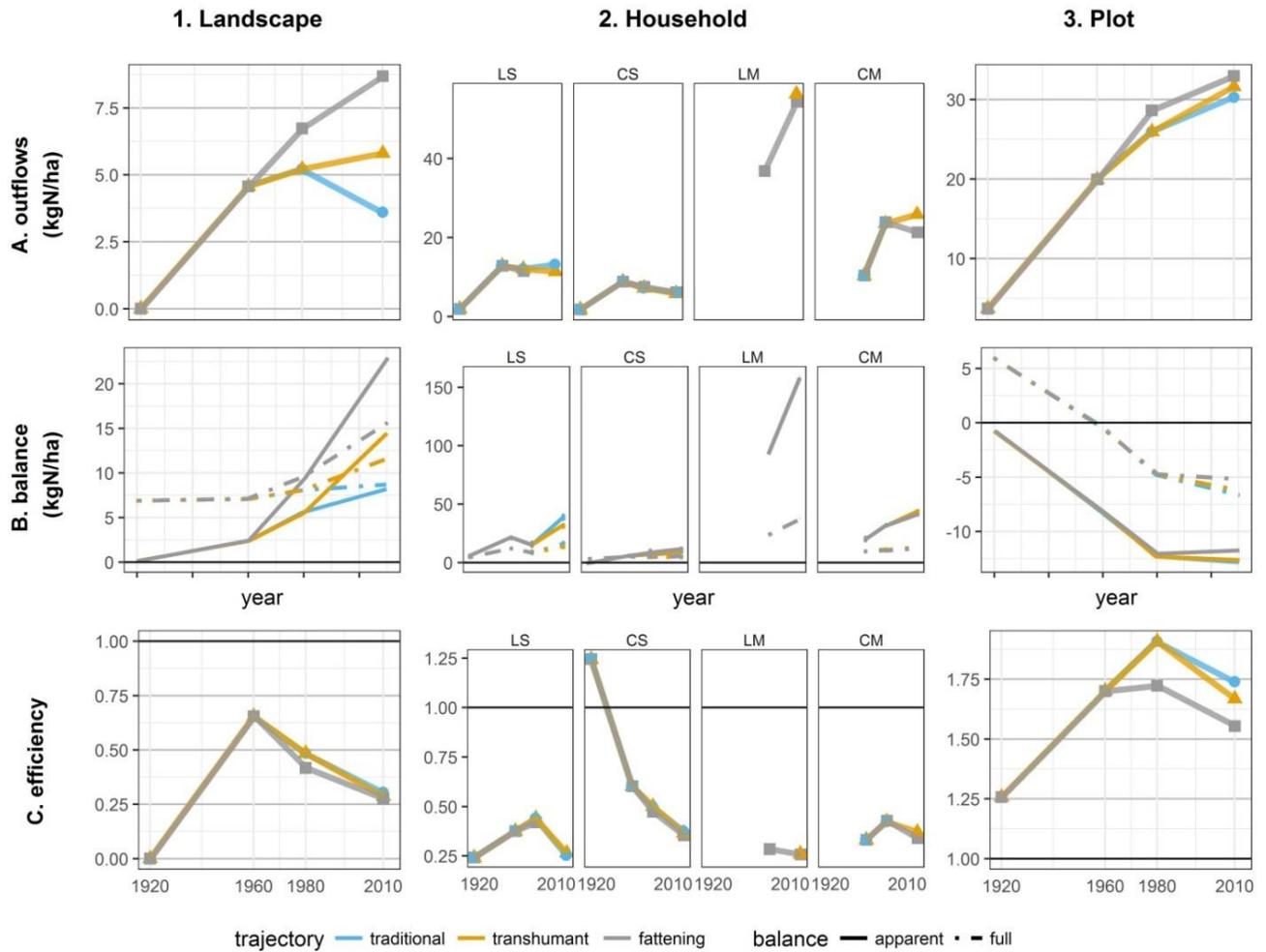


Figure 38. Simulated performance indicators at village landscape, household and plot levels

- A. outflows (kgN/ha)
- B. balance (kgN/ha) (solid line = apparent balance; dotted-dashed line = full balance)
- C. efficiency (dimensionless)
- 1. data for the whole village
- 2. data for each household of each type (LS = livestock-subsistence-oriented, CS = crop-subsistence-oriented, LM = livestock-market-oriented, CM = crop-market-oriented)
- 3. average data for plots

4.6 Discussion

4.6.1 Reorganization of the N cycle explained by changes in farming practices

The following section focuses on the general trends of the agrarian transition, i.e. without differentiating between the three simulated trajectories. As observed for the three simulated trajectories and in equivalent systems in Niger (Achard and Banoïn, 2003) and Burkina Faso (Vall et al., 2006), there is a concomitant increase in human and livestock populations and cropland expansion over the study period. The area available for free-grazing livestock decreases as the amount of rangeland is divided by 10 between the 1920s and the present decade with no increase in land under fallow (§4.5.1).

Simulations show that because changes in the landscape structure affected **farming practices**, biomass and nutrient flows also changed. **Nitrogen flows are reorganized** due to the transition from free grazing to in-barn livestock systems, as also observed in our study area by Lericollais (1999) and Sow et al. (2004). In terms of feeding practices, this reorganization corresponds to a shift from a “grazed forage based” system to a “harvested forage & feed concentrate based” system. In the 1920s, total livestock intake comes from plots where livestock grazes freely. Since the 1960s, the expansion of animal traction and in-barn fattening increases the need for stored forage and purchased feed concentrate (Sow et al., 2004). More crop residues are harvested, and less are consequently left for free grazing livestock. Similar dynamics are observed for biomass appropriation in other African countries where human population densification is continuing (Andrieu et al., 2015; Tottonell et al., 2015). Simulations show that the 1960s to the 1980s is a transition period in which forage-harvest and free-grazing livestock are both practiced, as observed in the study area by Lericollais (1999). On-field forage scarcity leads to increased use of rangelands by free grazing livestock, resulting in negative and decreasing nitrogen balances for this land unit (cf. §4.5.3). A manure management system also emerges; there is a shift from a system where most returns to crops are direct restitution during free-grazing and night corralling to a system where manure is stored in homestead areas and manure is spread by farmers. Consequently, the homestead areas become the major land unit providing both feed to livestock and manure to crops. Despite the reorganization of nitrogen flows, **spatial transfers** are maintained; rangelands, bush fields, and since 1960s homestead areas provide feed to livestock that favor the accumulation of nitrogen in home fields (preferential areas for night corralling and manure spreading). The **resulting spatial heterogeneity thus remains** throughout the study period (cf. §4.5.3 and Dugué (1998)).

Despite changes in farming practices and increasing use of inputs in absolute values (food and feed), the levels of **independence** of the ASPS is high (IND), i.e. limited nitrogen inputs relative to the total quantity of nitrogen flows. Total nitrogen flows increase more rapidly than nitrogen inputs, thanks to increasing productivity and **high levels of internal recycling** between crop and livestock activities (cf. §4.5.2). Three strategies can be identified in the three trajectories to keep livestock in the villages while the landscape is progressively dominated by crops: (i) in the traditional trajectory, extensive fallow areas are managed collectively and kept in order to isolate and feed livestock in the cropping season; (ii) in the transhumant trajectory, transhumance reduces the livestock stocking rate during the hunger season (at the end of the dry season) and thus reduces the demand for forage by the whole village; (iii) in the fattening trajectory, in-barn rearing isolates livestock from crops, harvested forage and imported feed is used to satisfy livestock needs thereby enabling the highest stocking rates (cf. §4.5.1). In the three strategies, livestock is indispensable to maintain high levels of nutrient recycling within the system (cf. §4.5.2), particularly in cases where the use of mineral fertilizer is limited as reported by Andrieu et al. (2015) in Burkina Faso and Dugué (1998) in Senegal and Burkina Faso.

4.6.2 The benefits of a multi-level analysis of N flows

The following section focuses on the comparison of the three trajectories for the present decade, i.e. when differences in the proportions of the different types of households were the greatest (cf. §4.5.1). In the modelling approach used in this paper, structure, functioning and performance indicators are available to assess ASPS at three

levels: landscape, household and plot (cf. §4.4.1). Thus, patterns observed at landscape level can be explained by patterns observed at smaller levels (i.e. at household level and at household components levels such as the plot and the manure heap) and conversely.

This study confirms the importance of taking household diversity into account in landscape level analysis (Belem and Saqalli, 2017; Thornton and Herrero, 2001). This diversity explains the simulated differences between villages. In the present decade, traditional villages are only composed of subsistence-oriented households (LS and CS). These households have the lowest population density and animal stocking rate and are the most independent and efficient households, which is reflected at landscape level. Indeed, less food, feed and mineral fertilizers are imported by subsistence-oriented households and, in the dry season, the livestock feeding system relies to a great extent on crop residues left in the field, and on fallows and rangelands in the rainy season. The highest proportion of market-oriented households is observed in fattening villages, where LM and CM households account for 25% of the household population. This household composition drives the system towards the highest human and livestock population densities, the highest intensification rate in terms of nitrogen flows and the lowest level of independence in the present decade. Transhumant villages are intermediate between the traditional and fattening villages. This type of village is composed of all types of households (LS, CS, LM, CM) — while the other types of villages are more specialized — and has medium rates of human and livestock densification, flow intensification and a medium level of independence.

The analysis at household level also shows that indicators for a given household type vary depending on the structure of the village landscape and on farming system diversity (i.e. a higher organization level). For instance in the present decade, livestock-subsistent households are more independent in the transhumant villages than in the traditional ones. In the transhumant villages, herds are outside the village during part of the year (the hunger season); consequently, nutrient exchanges due to forage intake and excreta deposition on the field during free-grazing are lower in the village itself. In crop-market oriented households, while total flow quantity (TST) between the transhumant and fattening villages does not differ significantly ($p < 0.05$), recycling intensities and independence levels are higher in fattening villages. In fattening villages, there are fewer free-grazing herds than in the other villages and households harvest the majority of their crop residues for their own herds, thus limiting nutrient exchanges among households within the village.

High positive nitrogen balances simulated at landscape level in the area round the homestead since the 1960s (cf. §4.5.3) are explained by the fact nitrogen accumulates in the manure heaps at the compartment level (Annexe 3). Since the 1960s, and particularly in market-oriented households, solid manure produced by in-barn livestock is stored in heaps and manually spread on the fields. Workforce and farm equipment (carts, draft animals) are lacking so manure heaps are consequently rarely completely empty (Audouin et al., 2015). Powell et al. (2004) also underlined the fact that workforce and farm equipment are limiting factors for the efficient use of solid manure. In addition, in our study area, like in most systems in West Africa (Blanchard et al., 2013), manure heaps are not protected from the rain, wind or sun. Consequently, runoff, leaching and gaseous emissions may be high during manure storage (Vayssières and Rufino, 2012). Such biophysical processes at low organizational levels explain differences between partial and full balances at higher levels. At the village level, full balances exceed apparent balances from the 1920s to the 1960s due to the high proportion of nitrogen fixed by legumes, trees included (*Faidherbia albida*) but the trend reverses after the 1960s as nitrogen fixation no longer balances the nitrogen losses that occur at plot and manure heap levels. The accumulation of manure in the homestead areas and N losses at plot and manure heap levels also explain the loss in efficiency in all three trajectories at both household and village levels (cf. §4.5.4).

4.6.3 Strength and limits of the modelling approach

Agent-based models are widely used to represent complex systems integrating both human and biophysical mechanisms in interaction (Le Page et al., 2013), such as the ASPs at stake here (Grillot et al., forthcoming). However

the reliability of the model outputs is often questioned based on their parameterization (Amblard et al., 2007). In this study, household structure and practices, based on household typology are very sensitive model inputs. Scenario construction was carefully thought out, and consistent data on the study area was available to build the scenarios (cf. §4.4.3). However, the further back we go in the past, the fewer quantitative data are available on farming practices and household diversity and consequently the more uncertainties there are on model inputs. We thus compared the simulations and the literature on structural data at landscape level. For instance, the population densities produced by the simulations have a bias of -6% for the 1920s, +2% for the 1960s, -7% for the 1980s and on average -2% for the present decade, compared to observations made by Dubois (1974) concerning the 1920s, Lericollais (1999) for the 1960s and 1980s, and Audouin (2015) for the beginning of the 2010s. In the simulations, land cultivated with millet is overestimated by on average +1% for the 1960s, 1980s and 2010s; observations in the study area reported 49% of millet in the 1960s, 57% in the 1980s (Lericollais and Milleville, 1993), and 63-64% in the beginning of the 2010s (Audouin et al., 2015) (Figure 35). Nitrogen flows and related indicators were not surveyed before the 2010s. TERROIR model outputs were compared with data collected in two contrasted villages surveyed in the beginning of the 2010s (Audouin et al., 2015), corresponding to a traditional-oriented (ScTrad) and a fattening-oriented (ScFat) system. This extensive comparison is reported in a paper dedicated to describing and evaluating the model, Grillot et al. (forthcoming) (Chapitre 2). Comparison showed that the main observed differences in the nitrogen balances and efficiencies between the two villages are well represented by the model at the three levels of organization (landscape, household and plot). We thus conclude that the model provides a realistic representation of ASPS studied.

The modelling approach used in this paper enables the analysis of various systems during an agrarian transition. It provides various comparable quantitative nitrogen flow-based indicators for these systems since the 1920s, which are particularly valuable for the analysis of ASPS in cases when such indicators were not measured in the past. The main limit of the methodology described in this paper is that the analysis of the agro-system transitions are based on “pictures” of distinct systems, i.e. on discrete indicator values, each of which is calculated for a specific period. The model represents the functioning of the systems at distinct steps (a “functioning model”) rather than the transitions between these steps (a “transition model”). One of the future developments of the modelling will be to shift from this “functioning model” to a “transition and functioning model”. Like a “functioning model”, a “transition functioning model” would detail the structure, functioning and performances of ASPS but, in addition, would be able to explore complete trajectories. Such a model would integrate modules detailing (i) the farming systems trajectories, i.e. the transition from one household type to another, (ii) the dynamics of the structure of farming systems, i.e. human and livestock population growth, and (iii) resulting land use changes, i.e. cropland expansion onto rangelands. For this purpose, strategic decisions that drive household and landscape dynamics in the long term will have to be integrated in the model.

This study can be considered as a first step in the model-based analysis of agrarian transitions. Here we show that “functioning models” can be used to identify patterns of past trajectories. Independence (based on crop-livestock integration) and spatial heterogeneity (due to spatial transfers) are two emerging properties that are maintained over years despite rapidly growing human population, crop expansion onto rangelands and rapid intensification of nitrogen flows (see §4.6.1 and 4.6.2). The identification of these patterns is important to make assumptions concerning the drivers of transitions. Although many studies focus on external drivers (e.g. market fluctuations and human migrations) to explain agrarian transitions in West Africa (Falconnier et al., 2015; Jahel et al., 2016), this study reveals the importance of internal drivers, e.g. technical choices made at household or/and community levels. The identification of key drivers is a critical methodological aspect of model-based prospective studies that use forecasting scenarios based on knowledge about the past (Houet et al., 2010; Voiron-Canicio, 2012). A parallel can be drawn with the pattern-oriented modeling approaches developed in ecology (Grimm, 2005). The persistence of some emerging properties may be considered as an underlying rule that has guided past agro-ecosystems transitions and that will probably guide future transitions. These rules can be used to make assumptions about alternative farming systems and the most likely agrarian transitions in the future.

4.7 Conclusion

This paper describes the use of an agent-based model to study a past agrarian transition. In a context of limited historical quantitative data on biomass and nutrient flows in past agro-sylvo-pastoral systems, the model produces original and extensive data on nutrient cycles at three levels of organization and can thus be used to assess the structure, functioning and performance of agro-sylvo-pastoral systems. Our simulations show that the expansion of croplands onto rangelands and a progressive change from subsistence to market oriented systems led (i) to a shift from “free-grazing” to “in-barn” livestock systems (with increasing storage of both forage and manure), and (ii) to an increase in nutrient flows driven by people coming into and leaving the homestead areas. Although nutrient cycles were reorganized over the years, two emerging properties of the agro-sylvo-pastoral system such as independence (based on crop-livestock integration) and spatial heterogeneity (due to spatial transfers of nutrients) were maintained throughout the study period (1920-2010). The maintenance of these properties may be considered as a key pattern of past trajectories. This pattern can be used to make assumptions about alternative farming systems and on the agrarian transitions that are most likely to occur in the future.

Acknowledgments

This work was supported by the French National Research Agency (ANR) [Projet ANR-13-AGRO-002, CERAO, Programme Agrobiosphère]. The authors would like to acknowledge the thoughtfully designed field work in the current villages by E. Audouin, T. Dugy, M. Odru and T. Saunier-Zoltobroda; as well as data formatting by M.-L. Balandier. We also thank ISRA-CERAAS for providing rainfall data for the study area.

5 Chapitre 4 : Discussion générale

Cette dernière partie a pour objectifs de :

- Répondre à la problématique de la thèse en discutant de la réorganisation du cycle de l'azote (N) dans les SASP étudiés (le bassin arachidier du Sénégal ici) ;
- Questionner la généralité du modèle construit pour simuler le fonctionnement et évaluer la durabilité des SASP ouest-africains sur la base d'une analyse pluri-niveaux du cycle de l'N sahélo-soudanien ;
- Confronter la transition agraire décrite et étudiée dans le cadre de cette thèse (le bassin arachidier du Sénégal) aux transitions agraires en cours en Afrique subsaharienne, dans le cadre d'une réflexion sur les possibles dynamiques d'intensification écologique.

5.1 Dynamiques du cycle de l'azote et identification de propriétés écologiques persistantes dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux du bassin arachidier

La littérature sur les SASP du bassin arachidier montre la diminution entre 1950 et le début des années 2000 des surfaces allouées aux troupeaux mobiles, notamment les zones de jachère et de parcours, voir par exemple [§1.2.2, Serpantié et al. \(2001\)](#) et [Lericollais et Milleville \(1993\)](#). Différentes pratiques d'agriculture traditionnelle et d'embouche ont également été décrites ([Lericollais, 1999](#); [Pélissier, 1966](#)). De façon complémentaire, ce travail de thèse a alors posé la question de l'impact de ces changements d'occupation du sol et des systèmes agricoles sur les cycles de nutriments ([cf. §1.3](#)) :

Comment les modifications concomitantes des paysages agricoles et des systèmes d'élevage pratiqués par les ménages impactent-elles la dynamique des cycles des nutriments et donc, le fonctionnement et la durabilité des SASP ? Quel est le lien entre les dynamiques individuelles au niveau du ménage et les dynamiques au niveau du terroir villageois ?

Cette section s'attache à discuter ces trois questions à partir des résultats de ce travail de thèse sur le cas d'étude du bassin arachidier sénégalais. Cette thèse décrit l'évolution d'un ensemble d'indicateurs caractérisant le cycle d'un nutriment, l'N, dans les SASP. Cette évolution des systèmes agricoles dans le bassin arachidier a été notamment présentée et analysée dans le [Chapitre 3](#). Elle met en évidence trois trajectoires types : « traditionnelle », « transhumance » et « embouche » ([cf. §4.4.3](#)). Dans la trajectoire « traditionnelle », le terroir villageois présente encore 10% de la surface agricole disponible en parcours ainsi que des ménages vivriers pratiquant l'élevage extensif et la jachère collective. Dans la trajectoire « embouche », le terroir n'a plus de surfaces de parcours et est caractérisé par le développement de ménages orientés vers les productions de rente, notamment l'embouche d'animaux afin de produire de la viande vendue sur les marchés locaux pour alimenter les villes. La trajectoire « transhumance » est intermédiaire, les terroirs qui en résultent présentent encore des zones de parcours et une petite partie des ménages reste orientée productions vivrières. Le chargement animal y est plus élevé que dans les terroirs « traditionnels » grâce au départ saisonnier des animaux en transhumance à l'extérieur du terroir en fin de saison sèche quand la biomasse disponible dans le terroir est insuffisante.

5.1.1 Intensification des flux d'azote et réorganisation du cycle de l'azote

L'évolution de la structure paysagère et des pratiques agricoles a modifié l'organisation des flux de biomasses et donc d'N. Cette évolution est représentée en [Figure 39](#), dans laquelle chaque SASP simulé (i.e. étape de transition agraire) est représenté par un cercle dans lequel les compartiments agricoles s'échangent des flux d'N. L'encadré décrit davantage la figure et le détail par compartiment est fourni en [Annexe 4](#).

La densité de population passe de 50 dans les années 1920 à 300 habitants/km² en 2010 pour le terroir le plus peuplé. Les SASP doivent augmenter leur production pour répondre à la demande locale. Aux différentes étapes simulées sur la période 1920-2010, et pour les trois trajectoires étudiées, on observe une **intensification des flux d’N**. C’est-à-dire qu’il y a une augmentation de l’intensité de flux circulant par unité de surface cultivée (l’hectare), particulièrement à partir des années 1960-1980 avec un passage de 50 en 1960 à 63 et 77 kgN/ha, respectivement pour les trajectoires « traditionnelle-transhumance » et « embouche » en 1980.

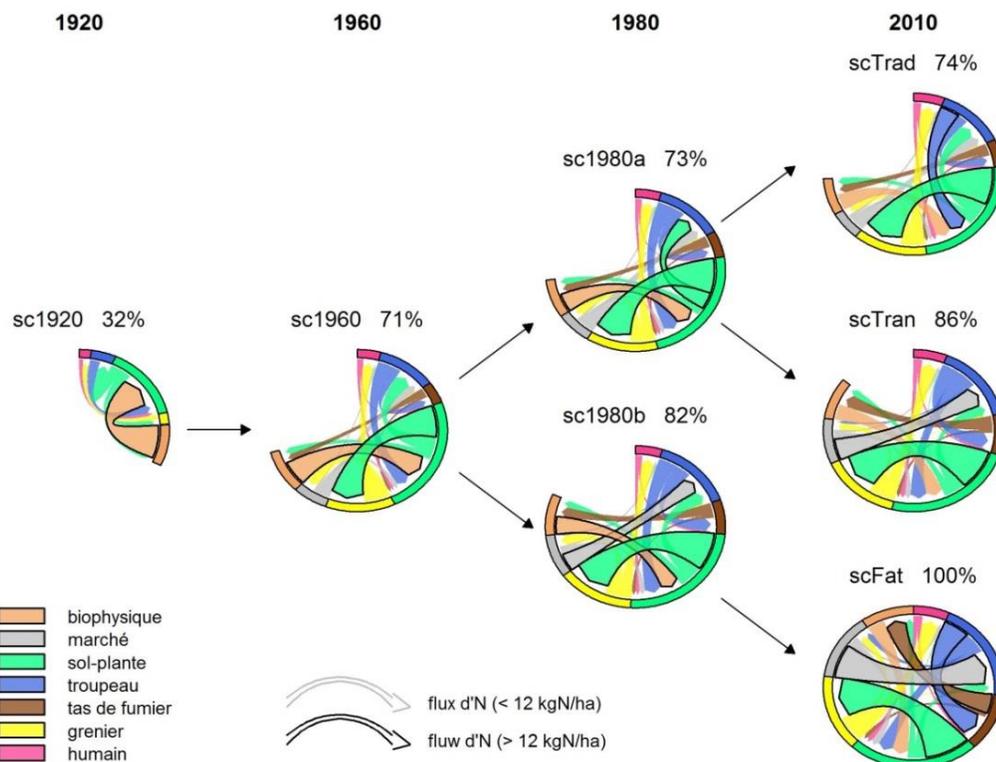


Figure 39. Evolution des flux d'azote entre les compartiments agricoles des SASP dans les 7 scénarios simulés avec le modèle TERROIR (1920 à 2010)

Voir encadré ci-dessous pour plus d'informations

Description de la Figure 39 :

- Chaque cercle correspond à une étape des trajectoires simulées (« traditionnelle », « transhumance » et « embouche »). Cela correspond à un scénario simulé : un SASP avec une structure paysagère et une répartition des types de ménages propres (sc1920, sc1960, sc1980a, sc1980b, scTrad, scTran, scFat).
- La trajectoire « traditionnelle » mène à la situation scTrad, la « transhumance » mène à scTran et « l’embouche » mène à scFat.
- La taille des cercles est relative au système le plus dense en flux d’N (i.e. scFat). Le pourcentage affiché correspond à la quantité de flux totale du système par rapport au système le plus dense (124kgN/ha circulant).
- Ce schéma se base sur le modèle stock-flux entre activités (cf. Figure 4). Chaque compartiment (humain, grenier, tas de fumier, troupeau, sol-plante, marché et biophysique) est représenté par un arc de cercle coloré.
- La taille de l’arc de cercle est proportionnelle à la contribution du compartiment aux échanges dans le système (flux entrants et sortants). Chaque flèche représente le cumul des flux d’N circulant dans le système. Leur épaisseur est proportionnelle à l’importance du flux (en kgN/ha). La bordure des flèches (noire ou grise) marque la différence entre les flux les plus intenses (> 12kgN/ha) et les moins intenses.

Dans les SASP, trois principaux **compartiments fonctionnels** ont besoin d'être alimentés pour fonctionner et produire : les hommes (la main d'œuvre), les troupeaux et le compartiment sol-plante (Landais, 1992). Depuis les années 1920, le principal fournisseur de biomasses pour l'alimentation humaine représenté est le grenier⁹ en zone d'habitat (Annexe 4). Le grenier est lui-même entièrement approvisionné par le compartiment sol-plante, localisé en zones cultivées. L'intensité des flux correspondants à ces échanges est proportionnelle à l'augmentation de surface.

Dans les années 1920, tous les troupeaux sont conduits en extensif. Ils alimentent le compartiment « sol-plantes » et réciproquement. Dès les années 1960 se développe la traction animale, et le compartiment fumier est intégré au système (Figure 39). Cela correspond au tas de fumier, accumulant les bouses et refus alimentaires produits à l'étable. Dans les évolutions telles que nous les décrivons entre 1920 et 2010, les animaux sont davantage nourris à partir de fourrages stockés dans les greniers ou achetés au marché (aliments concentrés). La part des déchets domestiques augmente dans les trois trajectoires, notamment dû à l'augmentation de la densité de population. Dans la trajectoire « embouche », on observe une diminution de la fertilisation par dépôt directs des animaux (déjections) au profit d'une augmentation des apports azotés sous forme de fumier (Annexe 4). La contribution des zones d'habitat aux approvisionnements en biomasses des troupeaux augmente à travers les stocks de fourrage et les importations de concentrés. Elle augmente également vis-à-vis de l'approvisionnement des sols, à travers les fumiers et les déchets domestiques épandus sur les champs. L'habitat devient une zone de transit pour la biomasse et donc le principal fournisseur en biomasses au sein des SASP, du fait de sa fonction de regroupement, stockage et redistribution.

Cette évolution correspond à une transition des systèmes d'élevage au pâturage vers des systèmes d'embouche, comme observée dans la zone d'étude par Lericollais (1999) et Sow et al. (2004). Dans les simulations, elle correspond à l'apparition de la pratique d'embouche dans les années 1980, praticable par tous les ménages, sauf les ménages vivriers orientés élevage qui conservent un système d'élevage extensif. Les ménages spécialisés dans cette pratique, i.e. les ménages rentiers orientés élevage gagnent également en importance à cette période. Les animaux embouchés ont un besoin élevé en aliments concentrés et leur introduction participe à l'augmentation de la contribution du « marché » aux flux totaux (Annexe 4 et Annexe 5). De même, les ménages pratiquant l'embouche récoltent une plus grande part de résidus de récolte que ceux qui la pratiquent pas ou peu. Cela correspond aux observations d'Audouin (2014) dans le terroir de Barry et de Dugy (2015) et Saunier-Zoltobroda (2015) dans le terroir de Sob. L'usage des fourrages stockés augmente, et particulièrement les fanes d'arachide (Annexe 4, Annexe 6 et Annexe 8).

Les simulations montrent que la part de résidus de récolte laissée pour la vaine pâture devient insuffisante pour alimenter l'ensemble des troupeaux conduits en extensif. Dans les différentes situations simulées, on observe une adaptation des pratiques d'élevage dues à la pression sur les ressources pâturables. Alors que les ménages modélisés ont pour objectif de répondre aux besoins alimentaires de leurs troupeaux, ils s'orientent vers la complémentation fourragère. L'émondage des arbres se pratique en plus grandes quantités, notamment dans le système traditionnel où la contribution des feuilles d'arbre émondées à la ration des troupeaux passe d'environ 2% entre 1920 et 1980, à 3 - 11% en 2010, selon la trajectoire (Annexe 6). Cela s'observe effectivement sur le terrain par un émondage plus précoce et des ressources plus rapidement épuisées (données d'enquête personnelle). De par leur phénologie, les *Faidherbia albida* sont en végétation durant la saison sèche ce qui permet d'alimenter les troupeaux en saison sèche, période difficile, durant laquelle leurs feuilles constituent la majorité de la ration¹⁰. Ils permettent également d'améliorer la qualité de la ration des troupeaux, du fait de la qualité nutritive de leur feuillage (Friot and Guérin, 2005).

⁹ Le grenier stocke les produits vivriers à destination de la consommation humaine (e.g. céréales sous forme de grains) mais également les combustibles (bois et bouses) et les fourrages stockés pour l'alimentation des troupeaux (pailles et fanes).

¹⁰ Résultats de simulation cf. Annexe 6, voir aussi Grange (2015) et Depommier et Guérin (1996)

Le développement de l'élevage d'embouche modifie également la gestion de la matière organique. Dans le système traditionnel, les animaux de traction (équidés) ainsi que les petits ruminants sont gardés auprès des habitations (Audouin et al., 2015; Lericollais, 1999). Seuls les équins mâles demeurent la totalité du temps dans les concessions, i.e. en zones habitées, tandis que les autres animaux sont laissés libres la journée. Ainsi, très peu de fumier est produit dans les concessions, en comparaison avec le système d'embouche où l'ensemble des ruminants à l'embouche est gardé dans les concessions. Dans ce dernier cas, les bouses des bovins sont accumulées dans les tas de fumier et non plus déposées directement dans les champs par les animaux. La gestion de la matière organique change. Via la production de fumier, les retours de matière organique ne sont plus directs depuis les animaux vers le sol mais passent par le compartiment tas de fumier. L'homme devient un acteur majeur de la gestion de ce fumier, avec des charges de travail, liées à la gestion de ce fumier, plus importantes (Annexe 7 et §5.3.2).

Ces manipulations et étapes supplémentaires augmentent le risque de pertes d'N vers l'environnement sous forme gazeuse et par lixiviation augmente. Une partie de l'N circulant s'accumule dans les tas de fumier des ménages, localisés dans les zones d'habitat (Annexe 9). Cette accumulation au niveau des ménages se répercute au niveau des terroirs. En conséquence, les systèmes perdent en efficacité. Dans les systèmes embouche, seule la bouse est récupérée avec les refus alimentaires. L'urine est laissée sur place dans les étables et l'N s'y volatilise en majorité étant donné la teneur importante en N ammoniacal. Le stockage du fumier est une étape dans laquelle les pertes azotées peuvent être élevées (cf. §5.3.2). Dans les années 1920, les pertes d'N liées à la volatilisation (sous forme de NH₃) lors du dépôt des excréments étaient compensées par la fixation d'N (sous forme de N₂) des légumineuses et particulièrement des *Faidherbia albida*. Dans les différents scénarios étudiés, la densité d'arbres diminue entre 1920 et 2010. Le développement de légumineuses telles que l'arachide dans la rotation culturale ne suffit pas à compenser la perte liée à la diminution de densité des arbres concomitante avec l'augmentation des pertes d'N liée à la gestion du fumier. Au cours des trois trajectoires étudiées, les pertes vers l'environnement sont croissantes et de moins en moins compensées par la fixation des légumineuses (Annexe 4).

5.1.2 Maintien du recyclage et de l'hétérogénéité spatiale

Malgré une réorganisation des flux d'N dans le cas d'étude sur la période 1920-2010, certaines propriétés des SASP semblent maintenues.

D'une part, depuis le début du 21^e siècle, les systèmes se sont ouverts vers l'extérieur avec une augmentation des importations d'engrais minéraux et d'aliments pour les consommations humaines et animales. Toutefois, relativement à la quantité d'N totale circulant dans les systèmes, les quantités d'N importées demeurent relativement faibles aux niveaux du terroir et des ménages (< 25%). Pour comparaison, au Kenya, Rufino et al. (2009b) ont étudié des systèmes mixtes agriculture-élevage hétérogènes dont les flux d'importations représentaient 12 à 72% des flux totaux d'N (pour une moyenne d'environ 50%). A Madagascar, Alvarez et al. (2014) ont étudié des ménages dans des systèmes agriculture-élevage important 26 à 41% des flux totaux d'N.

L'augmentation de l'intensité des flux d'N circulant dans le système et arrivant au niveau du système sol-plante permet une augmentation de la production agricole, en particulier des cultures. Associée au **fort taux de recyclage** de l'N, cela permet aux ménages et par conséquent, au terroir, de garder un fort niveau d'indépendance. Dans toutes les étapes de la transition étudiée, le recyclage entre les activités d'élevage et de culture est supérieur à 57, 74 et 76%, respectivement pour les trajectoires « embouche », « transhumance » et « traditionnelle ». Les systèmes demeurent bâtis autour des interactions entre agriculture, arbres et élevage.

La fertilisation azotée est toujours dépendante des activités d'élevage. L'élevage participe à plus de 60% de la fertilisation azotée des parcelles de par les dépôts directs (46 à 60% selon les scénarios en 2010) et l'épandage du fumier (11 à 14%) (Annexe 7).

Malgré l'augmentation d'utilisation d'aliments concentrés dans la ration des troupeaux (animaux de traction et à l'embouche), les champs et parcours participent à hauteur de 60 à 80% à l'alimentation animale selon les scénarios pour 2010 (en matière sèche). Herrero et al (2013) proposent une contribution plus élevée, à hauteur de 80 à 90%

pour les systèmes mixtes d'agriculture pluviale. Par contre, dans les simulations, la part des résidus de récolte dans l'alimentation totale des animaux en matière sèche est de 42 à 48%, fourchette plus élevée que les 30-35% proposés par ces mêmes auteurs. Cette différence s'explique par la forte densité de champs cultivés et donc la faible disponibilité en jachères et parcours dans la zone d'étude.

Les surfaces de parcours sont globalement en régression dans les SASP sur la période étudiée (1920-2010). Alors qu'ils ne sont quasiment plus présents dans le SASP orienté embouché, ils sont encore présents à hauteur de 10% de la superficie du terroir traditionnel et 4% du terroir transhumant. Toutefois, malgré leur diminution en surface, d'après les simulations, depuis 1960, les parcours fournissent aux ménages environ 30kgN/ha cultivé du terroir sous forme de graminées. Ils reçoivent environ 17 kgN/ha de terroir cultivé sous forme d'excréments. Ils participent encore à hauteur de 20 et 13% à l'alimentation fourragère des troupeaux, respectivement dans les SASP « traditionnel » et « transhumance » de 2010, contre 3% dans le SASP « embouche » (Annexe 6). Dans le Sud du Sénégal, en zone soudanienne où les SASP sont moins densément peuplés, les surfaces de parcours participent en moyenne pour 17% à l'alimentation des bovins (Ickowicz and Mbaye, 2001). Dans les situations étudiées dans cette thèse, les parcours sont très sollicités et sont d'ailleurs en déficit azoté (Figure 37). En conclusion, cette analyse des SASP du bassin arachidier indique toujours la forte pression qu'exerce l'augmentation des terres cultivées sur les parcours via l'élevage comme le supposait Lericollais (1999).

D'autre part, les **transferts spatiaux** entre unités paysagères sont maintenus dans les simulations entre 1920 et 2010. Initialement les transferts s'effectuaient des parcours et champs de brousse vers les champs de case via les animaux. Au cours de la transition, les pratiques d'embouche ont fait évoluer ces flux. Les flux vont toujours des champs de brousse vers les champs de case mais transitent via l'habitat. Les produits et coproduits de cultures sont stockés dans l'habitat, éventuellement donnés aux animaux à l'étable qui produisent le fumier qui est stocké avant d'être épandu en majorité dans les champs de case. Les flux circulant dans les systèmes se sont intensifiés mais on retrouve dans les grandes lignes la même structuration paysagère et hétérogénéité en termes de productivité végétale et animale et en termes de bilan et efficacité azotés. Tout au long de la période étudiée, les champs de case reçoivent davantage d'apports de matière organique (et donc d'N) que les champs de brousse, ce qui leur permet d'avoir de meilleurs rendements et un bilan azoté positif (environ 12 kgN/ha/an). Pour les champs de brousse, après une forte diminution des années 1920 à 1960, leur bilan azoté semble se stabiliser de nos jours autour d'une moyenne de -15 kgN/ha/an. Comme le soulignent Giller et al. (2006), ce **gradient de fertilité** au sein des terroirs villageois s'accompagne également de différences de gestion des champs, dont l'intensité augmente de la périphérie (les parcours et les champs de case) vers le centre (champs de case à proximité de l'habitat). Davantage de ressources (aussi bien la matière organique que la main d'œuvre) sont allouées aux champs de case. En comparaison avec les champs de brousse, les champs de case sont semés plus tôt, la densité de semis est plus élevée, les sols sont davantage travaillés et davantage de temps est passé pour désherber les champs (Audouin, 2014). Ces pratiques sont communes à bien des SASP d'Afrique Sub-saharienne et s'expliquent par le fait que les champs de case sont la source principale de produits vivriers (Giller et al., 2006). Ils sont plus proches des habitations (accès et observation facilité) et ils sont prioritaires pour les différents travaux d'entretien tels que le désherbage et sont donc en pratique plus productifs et plus efficaces (Audouin et al., 2015; Ganry et al., 2001). Ces pratiques permettent d'assurer la sécurité alimentaire des ménages (Tittonell and Giller, 2013).

Au sein même des champs de case et brousse, l'hétérogénéité des bilans azotés annuels est également très élevée. Cette **hétérogénéité intra-unité paysagère** s'explique par la rareté de la ressource en matière organique. L'augmentation progressive des ressources en biomasses et N disponibles par hectare cultivé dans les terroirs n'a pas été suffisante pour modifier fondamentalement la distribution spatiale de la ressource vers les sols. Les ménages d'un même terroir villageois continuent de gérer leurs champs de façon hétérogène. D'une part, la répartition des troupeaux entre les ménages n'est pas homogène et les propriétaires de troupeaux fertilisent préférentiellement leurs propres champs. D'autre part, les ménages privilégient les champs de case dans la distribution des apports de matière organique et donc d'N. Selon les simulations, seulement 10% des surfaces sont fertilisées avec du fumier dans notre cas d'étude dans le bassin arachidier du Sénégal. On retrouve des chiffres similaires pour divers terroirs

villageois au Niger, où seulement 3% à 8% des surfaces sont fumées, d'après [Hiernaux et al. \(1997\)](#). L'hétérogénéité inter-champs est particulièrement marquée dans les champs de case du fait de la pratique d'une rotation triennale de la fumure des champs ; autrement dit les champs de case sont fumés (par parcage nocturne ou par apport de fumier) en moyenne une fois tous les trois ans ([Dugué, 1998](#)). Cette pratique permet de concentrer les apports de matière organique sur une surface restreinte ([Annexe 9](#)). Cette pratique de **concentration des apports**, dans un contexte de rareté de la ressource en matière organique et en nutriments, a longtemps questionné les chercheurs ([Dugué, 1998](#); [Pieri, 1989](#)). Elle a été décrite dans de nombreux contextes ouest-africains et elle est souvent justifiée par une volonté des agro-éleveurs d'obtenir des arrière-effets dus à la minéralisation de la matière organique sur plusieurs années ([Freschet et al., 2008](#)).

On peut émettre l'hypothèse que cette hétérogénéité spatiale est encore plus marquée en pratique sur le terrain que ce que montrent les simulations. Effet, d'une part, le modèle ne tient pas compte de la distribution non homogène des pluies dans un même terroir pour une même année, et cette dernière peut être élevée en contexte sahélo-soudanien ([Akponikpè et al., 2011](#)). D'autre part, le modèle ne prend pas en compte l'hétérogénéité des sols et notamment la présence de parcelles où les sols sont plus argileux (sols *dek* dans le bassin arachidier) ([Pieri, 1989](#)). Or, ces deux paramètres peuvent générer encore davantage de variabilité de rendements intra-terroir et intra-unité paysagère.

Le recyclage de l'N et les transferts spatiaux permettent aux SASP étudiés d'avoir un haut niveau d'autonomie, plus marqué pour les SASP traditionnels et transhumants que pour ceux qui s'orientent vers la pratique de l'embouche. Cette dernière pratique rend les systèmes plus dépendants des importations d'aliments concentrés pour les animaux et consomment également davantage d'engrais minéraux. Ils sont plus sensibles aux variations de prix de marché des intrants mais également des produits animaux et végétaux qu'ils commercialisent.

5.1.3 Interactions entre les ménages et flux d'azote inter-ménages

Dans le modèle TERROIR, l'hétérogénéité des ménages est représentée en distinguant 4 types de ménages ayant des comportements et des activités différentes. La distinction des 4 types se fait sur la base de la visée (vivrier *versus* rentier) et de la nature (culture *versus* élevage) de leurs activités agricoles principales (cf. §2.4.3). Les ménages vivriers utilisent moins de ressources à l'hectare et pratiquent pas ou peu l'élevage d'embouche. Les ménages rentiers ont davantage tendance à importer des intrants (engrais minéraux et aliments concentrés) pour produire. Ils sont également dotés de davantage de ressources foncières, animales, matérielles. L'ensemble des ménages sont mixtes agriculture-élevage, ils pratiquent l'élevage et en majorité de petits ruminants conduits en extensif.

Les ménages vivriers orientés élevage sont les ménages qui ont le plus d'animaux conduits de manière extensive, alimentés en priorité par les ressources fourragères sur pied du terroir (i.e. non récoltées). Ils sont les principaux utilisateurs des surfaces de parcours en termes de chargement. Ils bénéficient également de l'N provenant de la vaine pâture et de l'émondage des *Faidherbia albida* sur les champs des vivriers orientés cultures, qui eux ne disposent pas d'assez d'animaux pour valoriser l'ensemble de leurs ressources fourragères. Ainsi, les troupeaux mobiles, via les processus d'ingestion-excrétion, génèrent des **transferts de biomasses** et donc de **nutriments**, depuis les champs des vivriers orientés culture en faveur des champs des ménages vivriers orientés élevage. Des transferts d'N équivalents ont été décrits en Afrique australe entre les ménages les moins dotés en ressources et les ménages les plus dotés en ressources, généralement pratiquant davantage d'élevage ([Tittonell et al., 2015](#); [Zingore et al., 2007](#)).

Dans les situations étudiées ici, au cours de la période 1920-2010, les simulations montrent que plus la part de ménages vivriers est élevée (nécessitant l'existence de parcours), et que plus les vivriers orientés élevage côtoient de vivriers orientés cultures, plus les échanges entre les ménages dans les terroirs sont intenses. En revanche, plus les surfaces de parcours sont faibles dans les terroirs, plus les ménages ont tendance à récolter les résidus de cultures, et moins il y a de **transferts entre les ménages** via les animaux.

En dehors des transferts d'N liés aux troupeaux mobiles, des échanges directs de biomasses ont lieu entre ménages. Les ménages rentiers, et particulièrement ceux orientés élevage, consomment davantage de céréales et de combustibles qu'ils n'en produisent et récoltent. Ils s'approvisionnent auprès des autres ménages. Dans le modèle, il n'y a pas de critères socio-économiques qui entrent en compte (cf. §3.6.2 et §3.8.3), ces échanges se réalisent selon la disponibilité de la biomasse agricole recherchée (ex. paille, céréale).

Du fait de ces interactions, les indicateurs pour un même type de ménage diffèrent d'une simulation à l'autre selon la configuration paysagère et la composition de la communauté villageoise (i.e. la répartition des ménages entre les 4 types). La notion d'**indépendance** varie notamment d'une situation à une autre. L'indépendance est mesurée par le rapport entre la quantité d'N importée et la quantité totale d'N circulant dans le système étudié. Les ménages vivriers orientés élevage sont très indépendants vis-à-vis du marché mais dépendants des ressources fourragères locales. A l'inverse, les ménages rentiers orientés élevage sont très dépendants du marché (aliments concentrés) et relativement peu des ressources locales. Au niveau du terroir, une plus grande valorisation des ressources locales, et notamment des parcours, entraîne une plus grande indépendance vis-à-vis des marchés extérieurs et un plus important recyclage des ressources au sein du terroir villageois. De ce fait, les simulations sont très sensibles à la présence des ménages orientés élevage, vivriers comme rentiers. On notera au passage, que dans chacun des scénarios représentant les trajectoires agricoles étudiées sur la période 1920-2010, au minimum 75% des ménages sont des vivriers orientés cultures.

Le déterminisme de la configuration paysagère et de la composition de la communauté villageoise sur les performances des différents types de ménages peut-être illustré en comparant les performances des ménages moyennées par type en comparant les trois trajectoires : « traditionnelle », « transhumance » et « embouche » (cf. §4.4.3). Par exemple, les ménages vivriers orientés élevage sont moins dépendants des ressources locales dans la trajectoire « transhumance » que dans la trajectoire « traditionnelle », pour la décennie actuelle (années 2010) en particulier. Le fait de laisser une partie du troupeau partir en transhumance permet d'alléger la charge sur le terroir et notamment sur les parcours¹¹.

De même, les ménages rentiers ont moins d'échanges avec les autres ménages via les animaux dans le cas de la trajectoire « embouche » que dans la trajectoire « transhumance », pour la décennie actuelle (années 2010) en particulier. En effet, dans la situation « transhumance », ces types de ménages bénéficient des parcours pour l'alimentation de leurs petits ruminants conduits en extensif. Dans la situation « embouche », il n'y a plus de parcours. Pour subvenir aux besoins de leurs animaux, les ménages sont contraints de stocker une plus grande quantité de fourrages. Ces ménages sont généralement auto-suffisants en fourrages issus des récoltes, toutefois ils ont besoin d'une plus grande quantité de fourrages stockés ce qui réduit leur capacité d'exportation. Ainsi, dans le cas de la situation « embouche », les ménages rentiers vendent moins de fourrages aux autres ménages que dans la situation « transhumance ».

L'appropriation des résidus de récolte diminue donc la disponibilité des fourrages pour la vaine pâture, ce qui affecte négativement les échanges entre ménages via les troupeaux. Ainsi les ménages vivriers orientés élevage perdent leur avantage comparatif dans une trajectoire où les ménages de rentes gagnent en importance et où les parcours sont en diminution. Dans ce type de situation, la viabilité des ménages vivriers orientés élevage est remise en cause. Elle explique l'absence de ce type de ménages dans la trajectoire « embouche » en 2010. On peut émettre l'hypothèse que les ménages vivriers orientés élevage se sont transformés, notamment en ménages vivriers orientés culture, suite à la vente de leur cheptel, notamment faute d'accès aux ressources fourragères. L'autre hypothèse seraient leur conversion en ménages rentiers orientés élevage par un changement des pratiques d'élevage, pour les plus riches d'entre eux.

¹¹ La dépendance aux ressources extérieures n'est pas prise en compte dans les calculs. Les animaux sont un stock qui peut évoluer au cours de la transhumance mais les flux relatifs à leur consommation alimentaire et excréation à l'extérieur du terroir sont extérieurs et non intégrés. Cette dépendance permet de nuancer les résultats dans l'analyse (cf. §5.3.2).

5.2 Un modèle réutilisable pour étudier les SASP en zone sahélo-soudanienne

Les principaux avantages de la modélisation sont rappelés par Sanders (2009, p. 124) : « Un modèle permet à la fois de tester des hypothèses sur l'évolution du système étudié et d'évaluer les conséquences de différentes situations initiales ainsi que celles de perturbations exogènes (i.e. un changement dans le contexte général dans lequel évolue le système). »

Le modèle TERROIR, construit dans le cadre de ce travail, prend en compte l'ensemble des flux de biomasses liés aux conduites agricoles. Il permet de représenter à la fois le fonctionnement des SASP au niveau individuel des ménages et au niveau collectif du terroir villageois. Inventorier ces flux de biomasses en situation réelle est coûteux en temps pour l'enquêteur et l'enquêté; cela prend, dans des conditions favorables, une journée d'enquête par ménage (Audouin et al., 2015). Les flux de l'année entière écoulée sont répertoriés. Le degré de précision des réponses dépend de la bonne volonté de l'enquêté mais également de sa mémoire, ainsi que de celle des personnes à qui il a délégué une partie des tâches (ex. alimentation des petits ruminants). Dans le bassin arachidier, il est fréquent que le chef de famille se déplace sur des périodes d'au moins un mois pour effectuer des transactions et les travaux agricoles sont généralement délégués aux plus grands enfants. L'analyse *ex-post* est peu réaliste sur le temps long de plusieurs décennies. Il est risqué de remonter précisément dans le temps pour récolter les données relatives à tous les flux de biomasses d'origine agricole au-delà de 1 à 2 ans précédant l'enquête. De même, spatialiser les flux requiert davantage de temps et de la précision dans la mémoire de l'enquêté. Les incertitudes et les risques d'erreur sont donc accrus quand on cherche à spatialiser les flux.

Le modèle TERROIR est particulièrement utile dans les cas où l'on souhaite avoir une idée du fonctionnement d'un système dans le passé ou même futur (non décrit dans cette thèse) et dont on ne détient que peu d'informations. Il permet de d'évaluer ou calculer des indicateurs qui requièrent une collecte de données coûteuses en temps, notamment relativement à la spatialisation des flux. Toutefois, étant donné qu'il a été construit et validé à partir de SASP dans le bassin arachidier au Sénégal, il est légitime de se poser la question de sa réutilisabilité dans d'autres contextes ouest-africains. Selon quels critères et à quelles conditions le modèle est-il réutilisable ? Cette section s'attache donc à discuter la généricité du modèle TERROIR pour les SASP sahélo-soudaniens et à proposer une méthodologie pour le réutiliser dans d'autres contextes.

5.2.1 Caractéristiques génériques des SASP représentées dans le modèle TERROIR

Thornton et Herrero (2001) ont proposé des points clés à prendre en compte lors de la conception de modèles relatifs aux systèmes mixtes agriculture-élevage. Le modèle TERROIR a été construit de sorte à répondre à ces points clés (Table 47). Il apporte la connaissance sur les systèmes mais pas d'information opérationnelle sur la gestion saisonnière des systèmes, au sens proposé de gestion de l'alimentation ou des pratiques culturelles.

Le modèle a été construit dans une optique de simplification afin de ne pas requérir trop de données pour son paramétrage. C'est une pratique proposée par Thornton et Herrero (2001) et utile, notamment dans le cas où les données sont peu disponibles comme dans les pays en développement (Jones et al., 2017). Cela correspond à l'approche « Keep It Simple Stupid » (KISS), proposée par Axelrod (1997) : partir du modèle le plus simple possible et aller, au besoin, vers un modèle plus complexe. Toutefois, l'intégration des pratiques de gestion de la biomasse des ménages fournit une vision descriptive détaillée du système et rend le modèle plus complexe. Ainsi, l'approche utilisée dans cette thèse tient davantage de l'approche « Keep It Descriptive Stupid » (KIDS) proposée par Edmonds et Moss (2004) : partant d'un modèle descriptif et évoluant vers davantage de complexité ou de simplicité selon les objectifs de modélisation. Le modèle TERROIR est dans un équilibre intermédiaire entre les approches KISS et KIDS de sorte à être suffisamment simple pour être générique pour les SASP sahélo-soudaniens tout en restant applicable à l'étude de cas d'étude diversifiés.

Une des caractéristiques fortes des terroirs villageois d'Afrique de l'Ouest est l'**hétérogénéité des ménages** présents. Cette diversité doit être prise en compte, notamment du fait des interactions entre ménages, comme montré dans le cas d'étude (cf. §5.1.3) et par Belem et Saqalli (2017) au Burkina Faso. Faire une **typologie** des

ménages est une pratique qui permet de simplifier la diversité des ménages et des pratiques, notamment dans un objectif de modélisation (Valbuena et al., 2008). Dans le modèle TERROIR, la typologie utilisée se base sur la prédominance des activités agricoles (élevage versus agriculture) et systèmes de production. Il s'agit d'une typologie similaire à d'autres typologies développées en Afrique de l'Ouest, par exemple celle de Vall et al. (2006) au Burkina Faso, et en Afrique de l'est, comme Castellanos-Navarrete et al. (2015) au Kenya. Cette classification rend compte des pratiques d'allocation des ressources, notamment de la matière organique, dans le temps, dans l'espace, entre les différentes parcelles et unités paysagères, et dans l'action, entre les différentes activités agricoles (Tiftonell et al., 2005).

Table 47. Points clés pour représenter des systèmes mixtes agriculture-élevage

Paramètres importants d'après Thornton et Herrero (2001)	Etat	Mode de prise en compte dans le modèle TERROIR (cette thèse)
1. Décrire et quantifier les interactions entre les composants du système	P	Deux modèles stock-flux (entre activités agricoles et entre unités paysagères) (Figure 4 et Figure 5).
2. Représenter les pratiques de gestion du ménage	P	Les ménages sont représentés comme des agents ayant leurs propres pratiques et leurs propres comportements (cf. §3.6.1.2.2).
3. Déterminer les impacts des stratégies de gestion sur l'usage des terres et autres ressources	P	L'occupation du sol et l'allocation des différentes biomasses sont représentées ; par exemple, le choix de privilégier les champs de case pour les apports de matières organiques. L'allocation d'autres ressources telles que la main d'œuvre n'est pas explicite.
4. Quantifier les bilans des nutriments au niveau du système	P	Quantification des bilans d'N au niveau de la parcelle, du ménage et du terroir villageois (cf. §4.6.2).
5. Quantifier la variabilité des performances du système associée à différentes conditions climatiques	P	Le climat est intégré dans le modèle, notamment dans les deux composantes : décisionnelle (e.g. adaptation des pratiques d'alimentation au disponible fourrager, (cf. §2.5.2) et biophysique (ex. réponse des productions végétales à la pluviosité) (cf. §3.10.4).
6. Informer sur la compétition (économique, environnementale, sociale) entre les différentes ressources de la ferme	Pa	La modélisation multi-agents permet d'intégrer les relations de compétition entre les agents (ménages et troupeaux) d'un même type mais dans les pratiques représentées les différents usages possibles des ressources n'entrent pas en compétition les unes avec les autres (i.e. à chaque ressource correspond un usage particulier) (cf. §3.6.2).
7. Donner la possibilité d'étudier les effets à long et moyen termes des stratégies étudiées	Pa	Les effets à moyen terme liés à la concentration de la matière organique et de l'arrière effet de la fertilisation sont pris en compte ; l'intégration d'évolutions long terme d'autres facteurs tels que la croissance de la famille est une perspective (cf. §5.3.3).
8. Traduire les sorties du modèle en support opérationnel pour la gestion saisonnière de la ferme	NP	L'objectif du modèle n'était pas d'analyser la conduite opérationnelle des SASP mais plutôt de se projeter sur le temps long (cf. §5.3.2).
9. Utiliser un minimum de données pour le paramétrage, la validation et l'utilisation générale du modèle, pouvant être réunies relativement facilement	P	Une analyse poussée du réalisme des simulations a pu être conduite à partir de cas d'études contrastés (cf. §5.2.2).
10. Intégrer des données de différents niveaux d'intégration	P	Intègre explicitement les connaissances disponibles et simulées à plusieurs niveaux d'organisation : parcelle/troupeau, ménage et terroir (cf. §4.6.2).

P : pris en compte ; PP : peut être pris en compte dans l'analyse ; Pa : partiellement pris en compte ; NP: non pris en compte

5.2.2 Vers l'application du modèle TERROIR pour étudier d'autres SASP sahélo-soudaniens

Le modèle TERROIR a été construit sur la base des caractéristiques communes aux SASP sahélo-soudaniens (Table 48). Il est donc possible de le réutiliser pour analyser le fonctionnement d'autres SASP pour d'autres cas d'études situés dans cette zone agro-climatique. Pour cela le modèle doit être adapté au niveau des données d'entrée, des décisions concernant le déplacement de la matière organique, et des paramètres biophysiques adaptables au cas d'étude. Ces données peuvent être issues d'enquêtes et/ou de données d'experts.

Concernant les données d'entrées du modèle, la structure paysagère et notamment la répartition spatiale des unités paysagères doit être connue. Cela peut être obtenu, dans un premier temps, à partir d'un travail de télédétection sur la base d'images aériennes ou satellites de la zone. Les zones d'habitations sont aisément reconnaissables ainsi que les zones arborées et/ou de marigots servant de parcours pour les animaux. La distinction entre champs de case et de brousse peut se faire à première vue à partir des cultures qui s'y trouvent. Les cultures de rente sont généralement localisées dans les champs de brousse (Augusseau, 2013; Lericollais, 1999) et les champs de case sont généralement plus sombres du fait d'un plus forte teneur en matière organique. L'entretien ou la discussion groupée avec quelques représentants des ménages permet de confirmer ce travail.

Quatre types de ménages sont représentés dans le modèle. Le modèle requiert, en données d'entrée, les principales caractéristiques de chaque type (Table 49). Ces données sont relatives au niveau de ressource des ménages et à leurs principales pratiques. Elles peuvent être acquises par des enquêtes sur la structure des ménages, plus légères que les enquêtes sur les flux. Pour la typologie utilisée ici, Balandier (2017) a procédé à une analyse multifactorielle et à une classification ascendante hiérarchique, afin de répartir les ménages en fonction de ces variables structurelles. De telles données sont déjà disponibles sur des terroirs au Burkina Faso (Vall et al., 2006) et au Sud Mali (Sanogo et al., 2010).

Le modèle d'action des ménages est basé sur des « arbres de décision » communs à tous les ménages mais dont les indicateurs de décision et les règles « si-alors-sinon » diffèrent selon le type du ménage. Ce formalisme permet ainsi une discrimination comportementale entre les différents types de ménages. Les flux de biomasses sont surtout sensibles au niveau de détails du système décisionnel gérant l'allocation des ressources, de la matière organique en particulier. Ils sont moins sensibles à l'augmentation de la précision des modèles biophysiques, comme démontré par van Wijk et al. (2009) pour son modèle à l'échelle de la ferme. La connaissance des principales actions de chaque type de ménages est donc déterminante pour la représentation des SASP et particulièrement des flux de nutriments qui y circulent.

Table 48. Caractéristiques des SASP sahélo-soudaniens prises en compte dans le modèle TERROIR

Caractéristique	Source	Représentation dans le modèle TERROIR (cette thèse)
1. Importance des interactions entre cultures-animaux-arbres en termes de recyclage de la biomasse	(Vall et al., 2011)	Les champs et troupeaux sont des agents qui interagissent (consommation de la végétation, excrétion pour fertilisation). Les arbres sont pris en compte et leurs feuilles sont consommées par les troupeaux et le bois utilisé comme combustible (cf. §3.6.1.2).
2. Traction animale	(Lhoste et al., 2010; Powell et al., 2004)	Les animaux de traction sont distingués des autres types d'animaux (cf. §3.6.1.2.3), leur importance affecte la capacité d'épandage des ménages, mais leur contribution aux travaux dans les champs (semis, sarclage) n'est pas prise en compte pour le calcul des rendements.
3. Les animaux sont les principaux moyens de fertiliser les sols	(Dugué, 1998; Powell et al., 2004)	Les pratiques de parcase et d'épandage de fumier sont explicitement représentées (cf. §3.10.3.2.1).
4. Le bétail sert d'épargne	(Powell et al., 2004)	Seuls les animaux d'embouche sont vendus à intervalles réguliers (cf. §3.6.1.2.3) mais des événements stochastiques pourraient être ajoutés pour simuler le besoin de vendre des animaux de manière impromptue.
5. Structure paysagère organisée en auréoles concentriques et une concentration des ressources dans les champs de case	(Manlay et al., 2004b; Ramisch, 2005)	Le terroir est représenté par une grille de cellules qui représentent les champs, groupés selon leur distance aux habitations et leur utilisation (champs de case, brousse et parcours) (Figure 1 en introduction générale), ce mode de représentation permet de spatialiser l'allocation des ressources.
6. Rotation culturale avec des céréales sèches et des légumineuses	(Powell et al., 2004)	Rotation de céréale (mil ici) et légumineuse (arachide ici), le modèle biophysique peut-être paramétré pour intégrer d'autres cultures telles que le sorgho et le niébé.
7. Haut niveau d'autoconsommation et main d'œuvre majoritairement familiale	(Powell et al., 2004)	Production majoritaire de cultures vivrières (céréales) pour l'autoconsommation en priorité; pas de travail rémunéré représenté (cf. §3.6.2.1).
8. Saison des pluies monomodale et agriculture pluviale	(Perret, 2008)	Trois saisons distinguées ; une unique saison culturale (i.e. pendant la saison des pluies) (cf. 2.4.1); agriculture pluviale pratiquée.
9. Forte variabilité de la pluviosité	(Perret, 2008)	La pluviosité est un paramètre d'entrée du modèle et peut être adaptée selon le cas d'étude (dans une fourchette de 400 à 800mm/an dans ce cas d'étude), à terme une fonction stochastique pourrait être ajoutée pour étudier la flexibilité des SASP face à l'aléa pluviométrique.

Le modèle distingue trois types de systèmes d'élevage : l'élevage extensif, l'élevage de traction et l'élevage intensif. A chaque système d'élevage sont associées des activités d'alimentation plus ou moins spécifiques : le pâturage, le stockage/déstockage de fourrage, la fauche en vert, l'achat extérieur de concentrés et/ou de fourrages). Il existe en Afrique de l'Ouest des variantes de ces différents systèmes d'élevage. Par exemple pour l'élevage intensif, l'élevage d'embouche dans le bassin arachidier peut être remplacé par de l'élevage laitier de contre saison

en périphérie de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso (Bénagabou et al., 2017). Le recours à une complémentation en aliments concentrés est récurrent dans le cas de systèmes intensifs. Les rations doivent être connues *a minima*. Des questions se posent telles que : Quelle quantité de concentré ou de fourrage est distribuée par UBT/jour ? Dans certains cas, la question de l'affouragement en vert se pose et notamment en lien avec la capacité du ménage à mobiliser de la main d'œuvre dédiée. La fauche d'un hectare de graminées peut produire environ 5 charrettes (i.e. environ 700 kg de matière sèche/ha). Avec 3 à 4 personnes, une telle fauche prend une semaine (données personnelles d'enquête). S'il s'agit d'une activité majeure pour l'alimentation des animaux, il est important d'en intégrer les paramètres limitants. Pour l'élevage extensif, le mode de choix de la parcelle à faire pâturer peut varier d'un SASP à un autre. Dans un cas où les pâturages sont plus abondants et plus riches d'un point de vue nutritionnel que les résidus de récolte par exemple, les priorités peuvent évoluer d'un contexte à l'autre. Le choix du lieu de parage est relatif à la pratique de fertilisation. Il est pour cela nécessaire de bien décrire les pratiques de répartition des ressources et particulièrement de la matière organique, en amont du travail de modélisation pour pouvoir ensuite si nécessaire ajuster les règles de décision.

Quelque-soit le contexte, il semble que les pratiques de fertilisation tendent à concentrer la matière organique dans les champs de case ; voir par exemple au Burkina Faso (Freschet et al., 2008; Lompo et al., 2000), au Mali (Blanchard et al., 2013) et au Sénégal (Manlay et al., 2004a). La question des quantités épandues, des durées de parage et les différentes combinaisons entre les différents moyens de fertilisation peut se poser. Dans le bassin arachidier, les ménages peuvent terminer la fertilisation d'un champ où des troupeaux ont été parqués avec du fumier dans le cas où le parage a été interrompu et n'a pas pu couvrir l'ensemble du champ ; cependant les agro-éleveurs n'y ajoutent jamais d'engrais minéral. Les animaux sont parqués en priorité sur des champs qui vont être cultivés en céréales et l'engrais minéral est préférentiellement appliqué sur la culture de rente (ex. l'arachide). Est-ce le cas dans toutes les zones ? Au Burkina Faso par exemple, le coton (autre culture de rente) est également fertilisé avec du fumier, et sa fertilisation peut combiner un apport d'engrais organique et minéral (Blanchard et al., 2013).

Table 49. Paramètres d'entrée du modèle requis pour les différents types de ménage

Paramètres d'entrée (pour chaque type de ménage)	Unité
<i>Niveau de ressources</i>	
Surface des champs de case	ha
Surface des champs de brousse	ha
Nb d'habitants	unité
Nb de ruminants	unité bovin tropical
Nb d'animaux de traction	unité
Quantités d'engrais minéraux disponibles (pour le mil)	kg matière sèche/an
Quantités d'engrais minéraux disponibles (pour l'arachide)	kg matière sèche/an
<i>Pratique</i>	
Assolement générique des champs de case	année 1 / année 2
Assolement générique des champs de brousse	année 1 / année 2 / année 3
Système d'élevage extensif	% ruminants totaux
Surface en cultures vivrières (céréales) visée	% surface cultivée
Résidus de récolte laissés au champ	% production

Du point de vue biophysique dans le modèle, les rendements cultureux dépendent de la réponse des cultures à la pluviosité et à la disponibilité en N. Pour le bassin arachidier, les principales cultures sont le mil et l'arachide. La réponse du mil à la pluviosité ainsi qu'à la disponibilité en N a été paramétrée et calibrée sur la base de données produites par le modèle de culture CELSIUS (Ricome et al., 2017). Toutefois, la réponse de l'arachide à la pluviosité et la disponibilité en N, semblant plus aléatoire (Garcia, 2015), elle n'a pas été intégrée dans le modèle. Pour une meilleure représentation du système pour l'arachide ou d'autres cultures sur d'autres zones (coton, sorgho, maïs), la mobilisation d'autres modèles ou d'autres résultats d'expérimentation disponible dans la littérature sera nécessaire, voire requérir des données complémentaires par des expérimentations spécifiques. Le couplage avec un modèle spécifique tel que SARRA-H (Dingkuhn et al., 2003) pour le mil ou le sorgho, ou encore DSSAT (Jones et al., 2003) pour le maïs et l'arachide, n'a pas été effectué dans la version actuelle du modèle. Ces modèles requièrent un large panel de données d'entrées qui ne sont pas toujours accessibles. Leur intégration au modèle présente le risque d'ajouter de l'erreur au modèle sans en améliorer la précision vis-à-vis de l'objectif de modélisation ; cf. utilisation des modèles *ad hoc*, Affholder et al. (2012). En outre, toutes les légumineuses ne sont pas fixatrices d'N (Vanlauwe and Giller, 2006). Si dans le cas du bassin arachidier, l'arachide et le niébé le sont, certaines variétés de soja par exemple, ne le sont pas, ce qui doit être ajusté dans le modèle au niveau des paramètres biophysiques (cf. §3.10.4).

La qualité du fumier peut être très variable d'un SASP à un autre. La composition du fumier varie en fonction de ce que les animaux consomment et excrètent. Dans le modèle, ces données ont été paramétrées à partir de mesures effectuées dans le bassin arachidier, dans des systèmes extensifs au pâturage et intensifs d'embouche complétés en concentrés (Grange, 2015; Wade, 2016). La nature des fumiers et les pertes azotées liées à leur stockage sont très variables en fonction des modes de conservation (Rufino et al., 2007). Dans le bassin arachidier, le fumier est généralement laissé en tas au soleil et au vent (Audouin et al., 2015) et les pertes sont importantes, contrairement à d'autres contextes, où le fumier peut-être plus pailleux et stocké dans des fosses fumières, c'est le cas par exemple au Burkina-Faso (Blanchard, 2010).

5.2.3 Vers un modèle d'évaluation multicritères

L'évolution du climat en Afrique de l'Ouest dans les prochaines décennies est incertaine, mais le risque d'accentuation de la variabilité climatique et de récurrence d'événements extrêmes (dont les sécheresses) est important (Guichard et al., 2015). De plus en plus d'études sur les systèmes agricoles d'Afrique de l'Ouest s'intéressent à leur capacité d'adaptation face à l'aléa climatique ; cf. par exemple, l'ouvrage édité par Sultan et al. (2015).

Le modèle décisionnel du modèle TERROIR a été construit avec l'objectif de représenter les ajustements réalisés par les agro-éleveurs tenant compte de l'évolution de l'état et de l'environnement des systèmes de production (ex. niveaux de stock des produits agricoles, engrais minéral ou matière organique). Ainsi, le modèle tient compte des nombreux effets en cascade sur les décisions de gestion des biomasses d'une diminution de la production agricole suite à une année sèche. Cela se traduit par un épuisement des stocks plus rapide que lors d'une année pluvieuse, tel que décrit dans le Chapitre 1. Il pourrait donc être intéressant d'utiliser le modèle TERROIR pour **évaluer la capacité d'adaptation et la flexibilité des SASP face à l'aléa climatique**.

Face à l'aléa climatique, la mobilité des animaux, via la transhumance, est également un facteur d'adaptation (Leclerc and Sy, 2011). Elle est déjà prise en compte dans le modèle mais ses modalités pourraient être affinées en précisant le seuil (vis-à-vis de l'indicateur d'abondance relative en fourrages dans le terroir), en-deçà duquel les ménages envoient leurs animaux en transhumance. Or tous les ménages n'ont pas les mêmes capacités d'envoyer leurs animaux en transhumance et donc les mêmes seuils. Les frais liés à la main d'œuvre du berger nécessitent souvent le regroupement de troupeaux de ménages différents. D'autres adaptations tactiques peuvent avoir lieu et devraient, à terme, être intégrées dans le système décisionnel du modèle. Il s'agit par exemple de l'ajustement des surfaces allouées aux cultures vivrières et de rente ; le déstockage anticipé d'animaux ; les migrations humaines,

notamment vers les villes pour du travail non agricole (Roquet, 2008). Ces migrations permettent de faire varier les besoins alimentaires des ménages au village. Cependant elles contraignent la force de travail disponible, pour l'instant non explicitement représenté dans le modèle TERROIR. L'utilisation de variétés cultivées diverses, à cycles plus ou moins longs, associées ou non, est également une adaptation à l'aléa pluviométrique qui pourrait être intégrée au modèle (Muller et al., 2015). Dans ce cas des modifications des composantes biophysiques seraient également à prévoir.

Le choix de l'intégration (ou pas) des options d'ajustement les plus pratiquées et efficaces peut être raisonné à partir d'un suivi sur plusieurs années, incluant si possible des années particulièrement sèches ou pluvieuses. Un tel suivi serait très coûteux en temps et en ressources. De manière alternative à l'observation, il est possible d'organiser des groupes de discussion pour traiter des adaptations des pratiques décrites en cas de saison sèche, moyenne, ou pluvieuse. Des supports physiques peuvent faciliter les échanges de connaissances dans le cadre de jeux sérieux. Dans ce cadre, il est possible de s'inspirer du jeu de plateau développé par Martin et al. (2011) pour les systèmes d'élevage en France. Cette approche requiert une phase de construction et d'adaptation du plateau

Cette thèse s'est concentrée sur l'analyse du fonctionnement et de la durabilité des SASP à partir d'indicateurs basés sur les flux d'**N**. Le Chapitre 2 s'intéresse uniquement aux flux d'**N actionnables**, sur lesquels l'homme agit directement. Les indicateurs décrits dans le Chapitre 3, intègrent également les flux d'**N purement biophysiques**, c'est-à-dire ne résultant pas directement d'actions des agro-éleveurs. Ils comprennent les sources et pertes d'**N** depuis et vers l'environnement. La prise en compte de ces flux permet de mesurer l'impact des pratiques sur l'environnement, les risques d'eutrophisation lié au lessivage par exemple.

L'**N** n'est toutefois pas le seul élément participant à la nutrition des plantes et à la fertilité des sols. Le phosphore (P), le potassium (K) et le carbone (C) sont également des éléments majeurs qui participent aux productions végétales et animales. Leur prise en compte pourrait être intégrée à l'évaluation de du fonctionnement et de la durabilité des SASP, concernant la gestion de la fertilité des sols notamment. L'analyse conjointe des cycles de l'**N** et du C permettrait notamment d'évaluer les principales sources de séquestration du C et d'émissions de gaz à effet de serre (N_2O , CH_4 et CO_2). Les émissions de gaz à effet de serre issues des activités d'élevage sont notamment un sujet d'actualité (Assouma, 2016; Herrero et al., 2016).

Etant donné que les flux représentés dans le modèle sont des flux de biomasses exprimés en matière sèche puis convertis en N, il est possible, à partir de la composition des biomasses, d'analyser les flux des autres éléments tels que P, K et C. Des équations du système biophysique devront être ajustées, comme par exemple celles permettant de simuler l'excrétion de P par les animaux. La représentation conjointe des cycles des différents éléments peut avoir un intérêt pour mieux représenter des processus biophysiques des SASP, tel que la croissance des cultures par exemple (Pieri, 1989; Soussana and Lemaire, 2014) et pour évaluer les risques de couplage et le découplage des cycles du C, N et P en particulier (Pieri, 1989; Soussana and Lemaire, 2014).

D'autres indicateurs de nature socio-économique sont également importants pour évaluer la durabilité des SASP. Certains peuvent être également calculés à partir des flux de biomasses. Ils peuvent être convertis en flux financiers (à partir des prix de chaque biomasse) et en quantité de travail (Castellanos-Navarrete et al., 2015; Vayssières et al., 2009a). En effet la quantité de travail est souvent proportionnelle à la quantité de biomasse manipulée, cela est particulièrement vrai en systèmes peu mécanisés tels que les SASP d'Afrique de l'Ouest.

Concernant les échanges de biomasses (céréales, fourrages, combustibles) entre ménages, le modèle TERROIR ne prévoit pas pour l'instant d'indicateurs spécifiques. La méthode Ecological Network Analysis peut être mobilisée pour analyser les flux de nutriments entre exploitations agricoles (Nowak et al., 2015). Les règles d'échanges entre ménages sont pour l'instant relativement simples dans le modèle TERROIR. Elles pourraient à l'avenir être davantage détaillées en tenant compte des règles de coordination existant dans les différents terroirs villageois d'Afrique de l'Ouest. Dans les villages traditionnels, comme celui de Diohine dans le bassin arachidier, les zones de jachères sont décidées pour l'ensemble du terroir selon un rythme de rotation précis. Ainsi, un réseau de prêt de champs permet

d'équilibrer au sein des ménages la proportion de champs en jachère et en culture¹². Ce type d'échanges permet aux différents ménages de bénéficier de la présence des animaux dans le terroir. Les échanges de champs ne sont pour l'instant pas prévus dans le modèle TERROIR mais c'est une pratique répandue en Afrique de l'Ouest (Lericollais, 1999; Powell et al., 2004).

Les réseaux sociaux ainsi que des logiques économiques guident également les échanges et peuvent être sources d'iniquités. Des études plus approfondies sont nécessaires pour les intégrer dans le modèle. Par exemple, on peut émettre l'hypothèse que les liens familiaux ou ethniques et la proximité des habitations impactent les relations d'échanges. En outre, les ménages font des dons religieux mais également aux ménages auxquels ils sont redevables. Dans le bassin arachidier par exemple, il est courant qu'un ménage aisé, davantage tourné vers les activités extra-agricoles, donne l'usage d'un de ses champs à un ménage plus agricole et bénéficie d'un pourcentage de sa production végétale (données personnelles). Des ménages a priori non auto-suffisants du fait de leur faible activité agricole peuvent s'avérer auto-suffisants du fait de ces transferts. Inversement, les ménages agricoles usagers des terres peuvent s'avérer en déficit suite aux transferts vers les propriétaires des champs. La prise en compte de ces interactions requiert d'intégrer, au moins en partie, les logiques d'activités extra-agricoles. Or ces activités sont très diverses et la collecte de telles données requiert une étude approfondie spécifique. Les migrations économiques vers les villes sont importantes dans les SASP du bassin arachidier et elles facilitent ces activités extra-agricoles. Les transferts financiers qui en sont issus participent au financement des activités agricoles (Lalou and Delaunay, 2015).

5.3 Dynamiques d'intensification des systèmes agro-sylvo-pastoraux dans le contexte régional ouest-africain

Le travail de reconstruction des trajectoires passées s'inscrit dans une démarche de prospective, comme le propose Voiron-Canicio (2012) : « Examiner les événements et les trajectoires passés, et en retirer des enseignements pour le futur constitue la finalité de la démarche rétrospective qui est associée à la prospective ».

Dans le bassin arachidier du Sénégal, les évolutions paysagères, les dynamiques des populations humaines et animales sont déjà relativement bien décrites (cf. §1.2.2). Ce travail de modélisation a permis notamment de décrire l'intensification des systèmes agricoles et des flux d'N à travers le temps. Elle montre l'augmentation des importations d'intrants azotés et l'augmentation de la production agricole.

Est-ce que la dynamique paysagère, le changement des pratiques et l'intensification observés dans ce cas d'étude sont représentatifs des évolutions observées dans le contexte régional ? Qu'apporte le cas d'étude à la problématique régionale ?

Cette partie s'attache à décrire les transitions agraires en cours en Afrique subsaharienne. Elle souligne le fait que l'évolution observée dans le bassin arachidier est similaire dans d'autres SASP de la zone sahélo-soudanienne. L'objectif est de (i) décrire les principales caractéristiques liées à la transition agraire, puis (ii) à partir des enseignements de cette thèse sur le cas d'étude « bassin arachidier », de proposer des pistes pour le développement et l'intensification écologique des SASP ouest-africains.

5.3.1 Dynamiques d'intensification en cours en zone sahélo-soudanienne

Dans le bassin arachidier, les activités d'élevage et de culture continuent d'être en interaction forte. Malgré les contraintes pesant sur les activités d'élevage extensif, liées à la diminution des espaces de pâturage et des ressources fourragères, les activités d'élevage se maintiennent. On observe également un passage progressif de

¹² Dans le cas où un ménage (A) n'a pas de champs dans la zone de jachère mais dispose d'un grand troupeau, il peut échanger un champ avec un autre ménage (B) ne disposant pas d'animaux. Le ménage (A) bénéficie alors de la jachère pour l'alimentation de ses animaux l'année n. En échange, le ménage (B) peut cultiver le champ du ménage (A) l'année n (champ en dehors de la jachère) et il bénéficie l'année suivante (n+1) de l'arrière effet des dépôts de matière organique sur son champ prêt.

l'élevage extensif vers l'élevage d'embouche. Une telle évolution a également été observée au Sud du Mali, zone densément peuplée (Dufumier and Bainville, 2006). Des dynamiques **d'appropriation de la biomasse**, via la récolte des résidus, ont été observées dans le bassin arachidier et intégrées dans les simulations à hauteur de 30% en moyenne des coproduits produits dans les fermes (Audouin, 2014; Dugy, 2015; Odru, 2013; Saunier-Zoltbroda, 2015) et sont d'environ 20% dans l'Ouest du Burkina Faso (Andrieu et al., 2015). Ces dynamiques d'appropriation ont également été décrites pour les systèmes mixtes agriculture-élevage au Nord du Cameroun par Dongmo et al. (2012) et en Afrique Sub-saharienne en général par Tittonell et al. (2015). En parallèle, le **niébé**, culture intercalaire, et l'**arachide**, culture de rente en difficulté, ne sont plus uniquement cultivés pour leurs produits mais également pour leurs **coproduits**. Quelques ménages possédant des troupeaux pratiquent la culture de niébé tardif dans l'unique but de nourrir leurs troupeaux et le marché des fanes d'arachide se développe pour l'alimentation des animaux d'embouche (Sow et al., 2004). Au Mali, des études ont déjà été menées sur les résidus de récolte et en particulier sur les fanes de niébé et d'arachide. Elles montrent notamment la variabilité saisonnière des prix de ces produits (Ayantunde et al., 2014). Dans cas d'étude du bassin arachidier du Sénégal, les fanes d'arachide contribuent de plus en plus à la ration fourragère des animaux (cf. §5.1.1 et Annexe 6). Certains terroirs au sud du bassin arachidier, plus proches des routes que les terroirs étudiés se spécialisent dans la production et commercialisation des fanes à destination des villes, pour l'engraissement des moutons pour les fêtes religieuses (données personnelles). Il serait intéressant de mieux prendre en compte, dans les prochaines études à mener, l'intérêt des cultures d'arachide et niébé du point de vue du système fourrager.

Dans le bassin arachidier du Sénégal, jusqu'aux années 1980, une logique de défriche et d'extension des terres disponibles cultivées prévalait selon une logique malthusienne. Similairement, dans les terroirs étudiés au Burkina Faso par Augusseau (2013), dans les zones nouvellement attractives où se développait l'agriculture, les espaces défrichables ont permis aux systèmes de supporter une augmentation de population sans intensification des activités agricoles en cours. A partir des années 1980, les terres cultivables se font plus rares et/ou plus distantes des habitations. Dans une analyse basée sur des critères économiques, Chamberlin et al. (2014) montrent que la disponibilité des terres en Afrique sub-saharienne serait plutôt dans la tranche basse des 400 à 800 millions d'hectares habituellement proposés. Ces estimations prennent notamment en compte l'accessibilité aux marchés et particulièrement aux infrastructures, ainsi que les risques sanitaires, déterminants importants du développement de l'agriculture. De plus, ils montrent que 49% des terres disponibles sont en zones de conflits et d'instabilité politique. Ainsi, l'option **d'intensification de la production** des terres cultivées devra être envisagée dans tous les cas, à plus ou moins long terme. L'intensification correspond à une augmentation dans le temps du rapport entre ressource mobilisée (ex. matière, énergie, ici nutriments) et surface cultivée. Elle peut se faire via l'importation de ressources externes (au risque de perte d'indépendance et de flexibilité face aux aléas) ou bien via une augmentation de l'efficacité du recyclage des ressources.

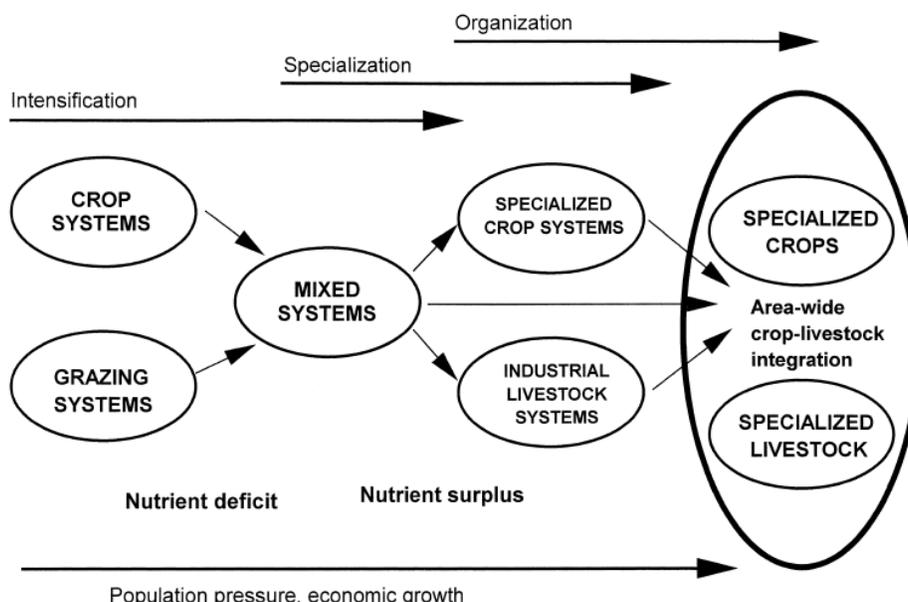
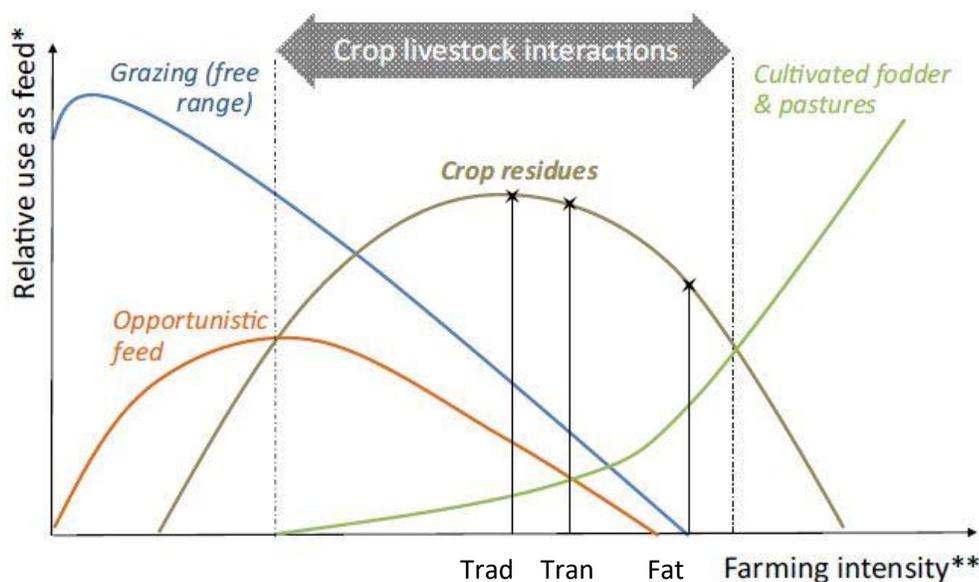


Figure 40. Evolution de l'intégration agriculture-élevage (Steinfeld, 1998 in Powell et al. 2004)

Le cas d'étude met en évidence de faibles bilans azotés au niveau des parcelles et un risque de dégradation de la fertilité des sols, notamment dans les champs de brousse. Des bilans négatifs récurrents ont également été décrits par [Stoorvogel et Smaling \(1993\)](#) puis revus par [Schlecht et Hiernaux \(2004\)](#), et plus récemment, observés par [Haileslassie et al. \(2007\)](#) en Ethiopie et [Diarisso et al. \(2015\)](#) au Burkina Faso. A partir de données dans trente-sept pays sub-sahariens et une analyse plus fine sur quatre pays d'Afrique de l'Est, [Drechsel et al. \(2001\)](#) montrent une forte corrélation entre perte de nutriments dans les sols et augmentation de la population. Plus récemment, [Headay et Jayne \(2014\)](#) montrent une corrélation entre l'augmentation de la population et la quantité d'N utilisée à l'hectare en Asie. Plus les systèmes produisent et exportent vers les marchés (locaux ou régionaux), plus ils exportent de nutriments et donc plus ils requièrent une augmentation des apports de nutriments pour compenser les exportations. Or, ces auteurs ne trouvent pas de corrélation dans le cas de l'Afrique subsaharienne. La Révolution Verte en Afrique a moins fonctionné qu'en Asie où l'adoption des engrais minéraux a été massive ([Mellor, 2014](#)). Ainsi, en Afrique subsaharienne, le risque de dégradation des sols semble d'autant plus important que les agro-éleveurs utilisent peu d'engrais minéraux ; ex. moins de 10kgN/ha dans le bassin arachidier du Sénégal ([Audouin et al., 2015](#); [Dugué, 1998](#)) et moins de 37kgN/ha dans l'Ouest du Burkina Faso ([Andrieu et al., 2015](#)).

D'après [Powell et al. \(2004\)](#), Steinfeld a proposé, en 1998, différents chemins d'évolution des systèmes agricoles ([Figure 40](#)). On observe un passage de systèmes extensifs, en déficits de nutriments vers des systèmes intégrés, puis vers des systèmes spécialisés. On retrouve la tendance qui, d'après [Tittonell et al. \(2015\)](#), a été décrite par l'ancien *System-Wide Livestock Program* mené par l'Institut International de Recherche sur l'élevage (ILRI) ([Figure 41](#)). Ces auteurs considèrent que l'élevage extensif basé sur le pâturage en parcours diminue au fur et à mesure de l'intensification du système. Ils suggèrent alors une augmentation de l'utilisation des résidus de récolte avec des interactions accrues entre les activités de culture et d'élevage dans le processus d'intensification agricole. Pour parachever cette intensification ils considèrent que les productions fourragères se développent avec la mise en place de pâturages gérés et de cultures fourragères.

Les SASP du bassin arachidier du Sénégal, comme ceux du Sud Mali ([Falconnier et al., 2015](#); [Rufino et al., 2007](#)) et de l'Ouest du Burkina Faso ([Andrieu et al., 2015](#); [Vall et al., 2017](#)) seraient au niveau *mixed systems* de la [Figure 40](#) et dans le pic d'utilisation des résidus de récolte de [Tittonell et al. \(2015\)](#).



* utilisation des aliments : seulement les fourrages, les concentrés ne sont pas pris en compte dans les aliments ici

** intensité agricole définie par le nombre de saisons de culture par an, la densité de population et la connectivité aux marchés ; développé par l'ancien *System-wide Livestock Program* par B. Gérard (adapté de Paul et al., 2013)

Les étoiles représentent le stade hypothétique des SASP du bassin arachidier : Trad pour le traditionnel, Tran pour le transhumant et Fat pour l'orienté embouche

Figure 41. Relation hypothétique entre l'intensité agricole ou potentiel agro-écologique et l'importance des résidus de récolte dans l'alimentation des troupeaux (d'après Tifton et al. (2015))

A l'issue de ce travail de rétrospective, se pose la question de l'évolution future des SASP : vont-ils évoluer vers des systèmes spécialisés et industrialisés ? L'objectif est, comme le propose Jouve (2006) d'éviter la dégradation irréversible de l'environnement et de passer directement à une gestion durable, notamment par le biais d'une intensification raisonnée, pensée sur le long terme, dans une logique de type boserupienne (Figure 42) (Boserup, 1965). Comme décrit en Introduction de cette thèse (cf. §1.2.2), l'intensification écologique des systèmes tend à limiter les impacts sur l'environnement et de maximiser l'utilisation des ressources disponibles sur place. En lien avec le concept d'agro-écologie, l'intensification écologique requiert, entre autre, d'optimiser la disponibilité des nutriments pour les productions végétales et animales et de minimiser les pertes et importations d'énergie et de matériaux en favorisant le bouclage des cycles (Bonaudo et al., 2014).

L'association agriculture-élevage est en cela un processus central du recyclage des ressources, et particulièrement de la matière organique. Les interactions entre ces activités ne s'arrêtent pas à la consommation de végétaux et restitution sous forme de matière organique. Dans le cas des systèmes d'élevage traditionnels extensifs, les troupeaux participent au retour des nutriments dans les sols via le piétinement et l'enfouissement de la matière organique. Cet enfouissement accélère la mise à disposition de la matière organique et notamment des nutriments. La présence des ruminants d'élevage favorise également la présence de coprophages et donc l'enfouissement de la matière organique et la séquestration du carbone (Assouma, 2016). Dans les systèmes d'élevage plus intensifs à objectif rentier, l'argent de la production animale (viande, lait) est réinvesti dans les cultures, voir par exemple le cas du bassin arachidier ici et les SASP du Sud Mali décrits par de Ridder et al. (2015). Inversement, en fin de saison de culture, après avoir pris en charge les dépenses de la vie quotidienne du ménage, l'argent restant est réinvesti dans des troupeaux pour la production animale. L'interaction agriculture élevage contribue donc pleinement au fonctionnement des ménages.

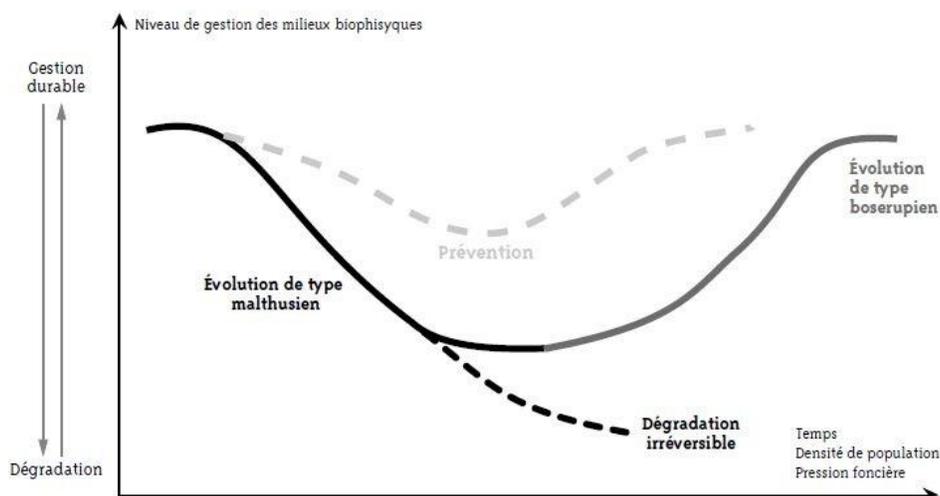


Figure 42. Transition agricole (Jouve, 2006)

5.3.2 Principales contraintes à l'intensification écologique des SASP par les activités d'élevage

Dans le cas d'étude de cette thèse, et également dans les SASP de la zone sahélo-soudanienne, on observe une diminution de la disponibilité des ressources fourragères pour l'élevage extensif. Dugué (1998) proposait notamment de restaurer les parcs arborés étant donné l'importance des arbres pour ces systèmes d'élevage (Friot and Guérin, 2005). Dans notre cas d'étude on voit que les arbres sont toujours de grande importance pour ces systèmes mais ont tendance à être surexploités (cf. §5.1.1), bien que les recommandations soient à leur préservation (Delaunay et al., 2009). La pression pour le bois de chauffe s'ajoute aux pratiques d'émondage pour l'affouragement des animaux en fin de saison sèche, bien que l'utilisation des bouses pour le feu de cuisine se généralise dans le bassin arachidier (Dugy, 2015; Saunier-Zoltobroda, 2015). Corbeels et al. (2014) au Burkina Faso proposent le développement de cultures fourragères pour maintenir l'élevage et permettre aux ménages les moins dotés en animaux d'avoir des champs enrichis en matière organique. Dans le bassin arachidier, les ménages ayant peu d'animaux prêtent leurs champs en jachère (la jachère est organisée et obligatoire dans certains villages) à un éleveur qui va bénéficier de ressources fourragères et y parquera son troupeau. L'éleveur va cultiver le champ durant la saison des pluies suivante pour bénéficier de l'arrière effet de son parcage. L'agriculteur récupère son champ l'année suivante et bénéficie également de l'arrière effet du parcage (données personnelles). La pratique de la transhumance permet de diminuer la charge animale au cours de l'année et pallier au manque de ressources fourragères locales mais crée d'autres dépendances, vis-à-vis des bergers et ressources régionales, nationales voir internationales.

Dans le cas des animaux d'embouche, l'augmentation de l'appropriation des résidus de récolte réduit le couvert du sol limitant les effets de protection contre l'érosion (Tittonell et al., 2015). Il est nécessaire de maintenir un équilibre entre prélèvements et restitutions. Dans les systèmes d'élevage où les animaux sont maintenus à l'étable (animaux de traction compris), la production de fumier, et les nouvelles pratiques de gestion de la matière organique génèrent des coûts internes et indirects principalement liés au déplacement et à l'épandage du fumier. Le fait que les animaux soient maintenus à l'étable réduit le retour des urines aux champs par rapport au système d'élevage extensif « traditionnel » basé sur le parcage nocturne. Or l'urine des animaux mobiles est une source importante d'N pour la fertilisation des cultures (Powell et al., 1996). Le stockage en tas de fumier génère également des risques de pertes d'N plus importants, par volatilisation essentiellement. En fonction des pratiques de stockage, les pertes d'azote au tas de fumier peuvent être très élevées, jusqu'à 25% de la quantité d'azoté déposée peut être perdue dans l'environnement à cette étape (Grange, 2015; Rufino et al., 2007; Wade, 2016). La pratique de l'embouche peut avoir des conséquences négatives sur la durabilité environnementale des systèmes, dans le cas où les pertes

liées au stockage du fumier ne sont pas limitées. Cela est d'autant plus marqué dans le cas d'étude ici, où le fumier a tendance à s'accumuler au niveau des habitations. Divers techniques existent pour limiter ces pertes pendant les phases de stockage et d'épandage (Vayssières and Rufino, 2012). La couverture et l'enfouissement du fumier sont des pratiques qui ont été expérimentées dans le bassin arachidier au Sénégal (Grange, 2015; Wade, 2016) et au Burkina Faso (Blanchard, 2010), de même que la variation de la durée de stockage en Afrique de l'Est au Kenya (Tittonell et al., 2010).

Dans le bassin arachidier, le retour du fumier aux cultures est faible comparé à la quantité de fumier produite du fait d'un manque d'équipement pour l'épandre (Audouin, 2014). La dimension limitante des moyens d'épandage (animaux de traction et charrette) a également été décrite pour d'autres SASP de la zone sahélo-soudanienne comme au Niger (Powell et al., 2004) ou au Mali (Blanchard et al., 2013). La traction animale permet de faciliter les travaux de préparation des champs, semis, épandage, entretien et récolte. De nombreuses contraintes relatives à cette pratique demeurent. D'une part, l'équipement est très variable d'un ménage à un autre et l'efficacité de l'équipement peut être très variable (ex. préparation du sol en 8h/ha avec cheval contre 16h/ha pour les ânes) (Lhoste, 1987). Les ménages les moins dotés en ressource sont contraints d'emprunter et/ou louer animaux de traction et charrettes tandis que les plus dotés en ressource produisent plus de fumier que ce qu'ils ne peuvent épandre. De plus l'épandage de fumier requiert de la main d'œuvre au moment de l'activité d'épandage mais également en amont, pour l'alimentation des animaux de traction. Enfin le déplacement du fumier mobilise des animaux de traction et demande d'accroître leur alimentation, ce qui n'est pas toujours possible dans un contexte de ressources fourragères limitées. Ces facteurs expliquent également pourquoi on retrouve une fertilisation organique préférentielle dans les champs de case (proches des étables) dans les SASP de type « embouche ».

Herrero et al. (2012) discutent notamment de l'amélioration de l'efficacité d'utilisation du fumier pour aider le système à se développer, améliorer la fertilité des sols et augmenter la production agricole et la sécurité alimentaire des populations. La gestion des tas de fumier doit être accompagnée notamment par l'amélioration des connaissances des agro-éleveurs sur cette étape clef du recyclage des nutriments (Rufino et al., 2007). L'état des savoirs locaux sur les différentes matières organiques disponibles et leur gestion est très variable selon les contextes et au sein d'un même ménage (Blanchard et al., 2013). Plus largement, l'intensification écologique requiert de plus grandes connaissances techniques de la part des ménages sur le fonctionnement des systèmes de production (Pretty et al., 2011).

Notre étude a montré l'importance des importations d'N sous forme d'aliments concentrés liés à un élevage d'embouche. Ces dernières permettent d'**injecter de l'N dans le système**, c'est-à-dire alimenter le cycle de l'N parcourant les SASP. C'est également ce qu'ont observé Castellanos-Navarrete et al. (2015) au Kenya. Cependant se pose la question de la gestion des effluents d'élevage ainsi produits. Tant que le fumier s'accumulera et ne sera pas géré de sorte à limiter les pertes, cela ne permettra pas d'améliorer l'efficacité et la productivité du système, permettant d'en assurer, en partie, sa durabilité. En outre, comme mentionné par de Ridder et al. (2015) dans le cas de l'intensification de la production laitière au Mali, les ménages les plus riches sont les principaux bénéficiaires de ce genre de pratique. En système intensif, tels que la situation « embouche » dans notre cas d'étude, la redistribution entre ménages est beaucoup plus limitée qu'en système « traditionnel » où intervient la vaine pâture. A l'avenir il est probable que l'intensification des SASP en Afrique se fasse dans un premier temps par l'élevage (via l'aliment concentré) plutôt que par les cultures (via l'engrais minéral). Il est donc impératif de maintenir des niveaux élevés de **recyclage des nutriments** entre les activités d'agriculture et d'élevage. C'est bien ce que semble confirmer l'étude rétrospective proposée par cette thèse (cf. §5.1.2). La valorisation des coproduits de l'agro-industrie dans la sous-région (son de mil et de riz, tourteaux de coton et d'arachide, etc.) sera un facteur clef de l'intensification des SASP par l'élevage. Les infrastructures liées à l'approvisionnement en intrants (variétés, sources de nutriments pour les végétaux et animaux) doivent également être développées pour qu'une plus large gamme de ménages puisse adopter des systèmes d'élevage plus intensifs.

5.3.3 Vers une utilisation du modèle pour de faire de la prospective

Différentes contraintes à l'intensification écologique des systèmes via le développement des pratiques d'élevage ont été soulignées (cf. §5.3.2). Avec le modèle actuel, il est possible de faire des simulations pour répondre aux questions de type « **What-if ?** » (« qu'est-ce qui se passe si ? ») pour imaginer les évolutions possibles des SASP à moyen terme, sur des horizons temporels inférieurs à une dizaine d'années (Börjeson et al., 2006). Dans ce cas l'utilisateur propose des scénarios correspondants à une évolution possible de paramètres du système. Avec ce type de scénarios, différentes évolutions de contraintes peuvent être testées. Par exemple il est possible de faire évoluer la capacité à épandre du fumier relative à la disponibilité des équipements et de main d'œuvre. La gestion du fumier peut être améliorée, cette option se traduira par une réduction des facteurs d'émissions au moment du stockage et de l'épandage. Différentes pratiques de fertilisation peuvent être testées, comme par exemple une fertilisation homogène dans l'ensemble des champs des ménages plutôt qu'une concentration sur les champs de case (telle que pratiquée dans les systèmes actuels). En outre, la capacité des SASP (réels ou modifiés) à répondre aux chocs climatiques peut également être testée. L'utilisation de temps courts dans le modèle est plus facilement appréhendable par les ménages et le modèle peut être utilisé avec eux pour ouvrir la discussion sur ces scénarios. La construction des scénarios peut d'ailleurs être effectuée en collaboration avec des experts locaux et/ou avec les ménages. Des expériences concluantes de simulations interactives pour raisonner l'intensification écologique des agroécosystèmes sont disponibles dans la littérature (Vayssières et al., 2009a).

Le modèle TERROIR intègre **divers niveaux d'organisation**, ceux de la parcelle, du troupeau, du ménage et du terroir, grâce à une structure emboîtée de type « poupée russe » (cf. § 3.6.1.2). Cette structure permet de représenter le fonctionnement d'un SASP par l'ensemble des interactions y ayant lieu. Cette thèse montre que les interactions entre ménages et notamment via les animaux sont multiples et peuvent être importantes en termes de flux de biomasses et de nutriments (cf. §5.1.3). La connaissance de ces interactions permet de distinguer les flux d'échanges entre ménages, internes aux terroirs, des flux avec les marchés. Ainsi, la prise en compte des interactions au sein des SASP permet de mieux représenter le fonctionnement des SASP et donc de rendre le calcul des indicateurs au niveau du terroir plus juste. Cette pratique d'**agrégation** est différente de la pratique d'extrapolation généralement utilisée lors de l'utilisation de modèles stock-flux à l'échelle de la ferme pour représenter des terroirs villageois (Andrieu et al., 2015; Rufino et al., 2011). Cette dernière utilise les données disponibles au niveau du ménage pour les projeter directement au niveau du terroir.

L'intégration de différents niveaux d'organisation permet de simuler un ensemble de **scénarios organisationnels** : notamment la disparition de règles collectives de gestion (ex. disparition des jachères collectives) et l'individualisation des pratiques ménages (ex. récoltes des résidus de culture). La distinction des différents niveaux d'organisation par les interactions permet donc d'intégrer les scénarios de prospective visant à l'intensification écologique des terroirs via une augmentation des échanges entre ménages, par exemple.

La prise en compte des niveaux inférieurs (parcelle/troupeau et ménage) permet de faciliter la discussion avec les ménages eux-mêmes. Chaque ménage représenté dans le modèle suit un arbre de décision dans lequel les ménages réels peuvent se reconnaître et projeter leurs propres pratiques. Dans l'étude au Mali de Falconnier et al. (2015), les ménages issus d'un SASP se reconnaissaient dans la typologie proposée et dans les trajectoires types décrites. Les données produites aux plus bas niveaux permettent également d'expliquer les indicateurs aux niveaux supérieurs. L'accumulation de fumier au niveau de l'habitat explique une augmentation des bilans aux niveaux du ménage et du terroir qui peut, à première vue, être contradictoire avec des bilans azotés faibles au niveau de la parcelle (cf. §4.5.4). Dans une optique de simulations de SASP futurs ou alternatifs, il est possible de rendre compte des évolutions aux niveaux inférieurs (ex. la parcelle dans le cas d'une action sur la fertilisation) et de ces conséquences au niveau supérieur (le terroir villageois). La structure du modèle permet donc d'analyser plus finement les résultats de simulation. Par exemple, une augmentation ou une diminution de l'hétérogénéité au niveau des parcelles des ménages ne se traduit pas systématiquement par la même évolution au niveau de l'unité paysagère, en fonction de la répartition des différentes parcelles possédées par les ménages dans le paysage.

La démarche de modélisation ici est **ascendante**, i.e. on part du ménage et des niveaux inférieurs puis on produit les données au niveau des terroirs. Le modèle ne prend pas en compte les facteurs qui interviennent aux niveaux supérieurs du terroir (ex. migrations humaines, opportunités de marché, développement de politiques agricoles et d'infrastructures régionales) (Hervé and Castella, 2009), ni celles qui interviennent sur le long terme (ex. évolution démographique, changement climatique). Dans cette étude, les trajectoires sont étudiées à partir de scénarios correspondants à des situations et données d'entrées à différentes étapes de la transition. Le modèle TERROIR est un **modèle d'état**, qui simule le fonctionnement des SASP, en opposition aux **modèles de transition** qui intègrent les évolutions de paramètres sur le temps long. Ce second type de modèle existe en Afrique de l'Ouest mais avec une incertitude sur les dynamiques simulées ; par exemple, voir le modèle de croissance démographique et d'expansion des terres cultivées au Burkina Faso (Jahel, 2016) ou le modèle plus théorique et générique de dynamiques des ressources en carbone en réponse à ces deux mêmes drivers (Belem et al., 2011).

Actuellement le modèle décrit de façon fine le fonctionnement d'un SASP, et non pas son évolution sur le long terme. L'étude des trajectoires passées a nécessité un travail important amont de scénarisation à partir de données historiques (cf. §4.4.3). Effectuer des simulations sur le temps long afin d'explorer les futurs possibles est une perspective prometteuse d'utilisation du modèle. Cette perspective requiert le développement de nouveaux modules et la récolte de nouvelles données issues de la littérature et/ou du terrain pour décrire, intégrer et simuler des processus ayant trait au temps long. Par exemple, il est possible d'ajouter la croissance des populations humaine et animale, les dynamiques d'évolution paysagère, en lien avec l'évolution des pratiques d'occupation du sol (ex. relatives à la défriche), les dynamiques économiques et logiques de marché vis-à-vis des cultures de rente et produits animaux, les politiques agricoles, notamment en lien avec le foncier (Gonin, 2016). Cela requiert non seulement des données contextuelles (ex. évolution du climat), mais aussi des données intrinsèques telles que les règles guidant l'extension des terres cultivées et l'évolution des activités agricoles des ménages. Ces dernières règles correspondent aux stratégies des ménages, intégrant leurs objectifs généraux et long terme. Elles peuvent être matérialisées par des règles de transition d'un type de ménage à l'autre. Les règles guidant ces transitions sont généralement établies à partir d'étude des trajectoires passées de ménages agricoles (Moulin et al., 2008), intégrant par exemple l'évolution des données structurelles d'un grand nombre de ménages (Falconnier et al., 2015), ou sur l'analyse plus en détail de l'évolution des pratiques de quelques ménages (Moulin et al., 2005). En référence aux travaux de modélisation en écologie (Grimm, 2005), il est également possible d'intégrer des comportements généraux intervenant aux niveaux supérieurs de l'agroécosystème (le terroir villageois ici) pour guider les trajectoires individuelles des composantes de l'agroécosystème étudié (les ménages ici). En ce sens le **maintien des deux propriétés écologiques** que sont un haut niveau de recyclage des nutriments et une structuration du paysage en auréoles concentriques de fertilité et d'intensification, pourrait être un *pattern* fort à intégrer dans l'exploration des trajectoires futures des SASP en Afrique de l'Ouest.

6 Conclusion générale

Dans le cadre de cette thèse, le modèle multi-agents TERROIR a spécialement été construit et implémenté. Il a pour objectif de simuler le fonctionnement et d'évaluer la durabilité de divers systèmes agro-sylvo-pastoraux (SASP) en Afrique de l'Ouest. L'**intégration de trois niveaux d'organisation**, troupeau/parcelle, ménage et terroir villageois, permet de représenter un SASP par l'ensemble des interactions ayant lieu entre les éléments le constituant. Les troupeaux sont des acteurs non négligeables dans les interactions entre les ménages. Ils mobilisent à la fois des ressources individuelles telles que les fourrages stockés dans les concessions et des ressources communes du terroir telles que les parcours et les résidus de culture laissés au champ.

Les flux de biomasses et d'azote sont représentés en référence à **deux modèles conceptuels** de type stock-flux : un modèle dont les compartiments sont les activités agricoles et un autre dont les compartiments sont les unités paysagères du terroir villageois. L'analyse combinée de ces deux modèles conceptuels permet notamment de décrire le recyclage et les transferts spatiaux de biomasses et d'azote. L'évaluation du modèle souligne sa capacité à représenter des SASP contrastés, dans lesquels on trouve une diversité de ménages et pratiques agricoles, ainsi qu'une diversité de structures paysagères, notamment en termes d'importance des parcours dans le paysage.

Le modèle a été utilisé pour explorer les dynamiques territoriales et la **transition agraire** intervenues sur la période 1920-2010 dans le bassin arachidier au Sénégal. Le cas d'étude est une zone agricole à transition agraire avancée caractérisée par une croissance rapide de sa population humaine, une expansion des zones cultivées au détriment des parcours, des variations climatiques importantes et deux phases successives d'essor puis de régression de l'arachide en tant que culture de rente.

Les simulations montrent **une réorganisation du cycle de l'azote** aussi bien au niveau du ménage que celui du terroir villageois. Le modèle permet d'**expliquer** cette réorganisation du cycle de l'azote par une évolution des activités et des pratiques des ménages. Le développement de la pratique de l'embouche de ruminants augmente la consommation d'aliments concentrés et modifie les pratiques de gestion de la matière organique. Les animaux à l'étable produisent du fumier ensuite épandu par l'homme, les retours directs dans les champs par les animaux sont donc diminués. Les résultats de simulation soulignent une tendance générale à l'intensification des flux et à l'augmentation de la dépendance des agro-écosystèmes vis-à-vis de sources extérieures de nutriments. Une transition dans l'alimentation fourragère est également notée, avec une augmentation de l'utilisation des résidus de récolte face à une diminution des ressources herbacées spontanées, en lien avec la réduction des surfaces en jachère et en parcours. Le modèle permet également d'**identifier des étapes limitantes** dans le recyclage de la biomasse et de l'azote. En effet, les différences de bilans azotés aux trois niveaux d'organisation (parcelle/troupeau, ménage, terroir) ont permis d'identifier une accumulation apparente d'azote au niveau de l'habitat et des tas de fumier dans les ménages, et particulièrement pour les ménages pratiquant l'embouche.

Les simulations montrent également que malgré une réorganisation marquée du cycle de l'azote, le recyclage et les transferts spatiaux d'azote internes aux terroirs villageois restent à des niveaux élevés. L'**intégration sol-plantes-animaux-hommes** et l'**hétérogénéité spatiale** de la répartition des ressources fertilisantes apparaissent comme deux propriétés persistantes des agro-écosystèmes étudiés. Le recyclage de la matière organique entre les différentes activités permet de réduire la sensibilité des agro-écosystèmes aux incertitudes climatiques et économiques. L'hétérogénéité spatiale inter-champs et inter-unités paysagères en termes de bilans azotés, de rendements et d'efficacités résulte des actions de gestion de la biomasse des agro-éleveurs. Elle permet d'assurer la sécurité alimentaire des ménages dans un contexte de ressources limitées (en fertilisants, en main d'œuvre, etc.). Aujourd'hui gommée dans les systèmes agricoles à hauts niveaux d'intrants, dans les pays industrialisés notamment, cette hétérogénéité est centrale dans les pratiques d'allocation des ressources des ménages en zone sahélo-soudanienne où les ressources productives sont limitées. Consolider cette intégration et cette organisation spatiale semble être un gage pour la **durabilité** des futurs systèmes agricoles qui émergeront dans un contexte à venir de

forte croissance démographique et de changement climatique. Elles peuvent tout à fait s'inscrire dans une dynamique d'**intensification écologique**.

Cependant l'évaluation de la durabilité des SASP réalisée par le modèle TERROIR est incomplète. L'évaluation technico-environnementale réalisée ici à partir des flux d'N, pourrait être complétée par une évaluation multicritères intégrant d'autres indicateurs environnementaux et socio-économiques. Certains de ces indicateurs peuvent être calculés à partir des flux de biomasses simulés par le modèle, comme par exemple le bilan gaz à effet de serre, les temps de travaux et la marge brute économique, afin de représenter les trois piliers du développement durable.

Le modèle TERROIR est un modèle « de fonctionnement » qui ne simule pas l'évolution des SASP sur le temps long, contrairement à un modèle de « transition ». L'intégration de processus long terme tels que les stratégies d'adaptation des ménages en réponse à la croissance démographique, l'essor de la demande en produits agricoles, l'émergence de nouveaux marchés, etc., permettraient de simuler les transitions en continu. En référence aux travaux de modélisation en écologie, il est possible d'intégrer des comportements généraux intervenant aux niveaux supérieurs de l'agroécosystème (le terroir villageois ici) pour guider les trajectoires individuelles des composantes de l'agroécosystème étudié (les ménages ici). En ce sens, le maintien des deux propriétés écologiques que sont un haut niveau de recyclage des nutriments et une structuration du paysage en auréoles concentriques de fertilité et d'intensification, pourrait être des caractéristiques fortes à intégrer pour l'exploration **des trajectoires futures** des SASP en Afrique de l'Ouest.

Bibliographie

- Achard, F., Banoin, M., 2003. Fallows, forage production and nutrient transfers by livestock in Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65, 183–189.
- Affholder, F., 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research* 79–93.
- Affholder, F., Poeydebat, C., Corbeels, M., Scopel, E., Tittonell, P., 2013. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. *Field Crops Research* 143, 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.021>
- Affholder, F., Tittonell, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., Wery, J., 2012. Ad Hoc Modeling in Agronomy: What Have We Learned in the Last 15 Years? *Agronomy Journal* 104, 735. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0376>
- Agegnehu, G., Amede, T., 2017. Integrated Soil Fertility and Plant Nutrient Management in Tropical Agro-Ecosystems: A Review. *Pedosphere* 27, 662–680. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60382-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60382-5)
- Akponikpè, P.B.I., Minet, J., Gérard, B., Defourny, P., Biellers, C.L., 2011. Spatial fields' dispersion as a farmer strategy to reduce agro-climatic risk at the household level in pearl millet-based systems in the Sahel: A modeling perspective. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.10.007>
- Alexandratos, N., Bruinsma, J., others, 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper Rome, FAO.
- Alvarez, S., Rufino, M.C., Vayssières, J., Salgado, P., Tittonell, P., Tillard, E., Bocquier, F., 2014. Whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: An application of network analysis. *Agricultural Systems* 126, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.03.005>
- Amblard, F., Bommel, P., Rouchier, J., 2007. Assessment and validation of multi-agent models, in: Phan, D., Amblard, Frédéric (Eds.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*. Bardwell Press, Oxford, pp. 93–116.
- Andrieu, N., Vayssières, J., Corbeels, M., Blanchard, M., Vall, E., Tittonell, P., 2015. From farm scale synergies to village scale trade-offs: Cereal crop residues use in an agro-pastoral system of the Sudanian zone of Burkina Faso. *Agricultural Systems* 134, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.08.012>
- Assouma, M.H., 2016. Approche écosystémique du bilan des gaz à effet de serre d'un territoire sylvo-pastoral sahélien : contribution de l'élevage (Doctorat). AgroParisTech, Montpellier, France.
- Aubry, C., Papy, F., Capillon, A., 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems* 56, 45–65.
- Audouin, E., 2014. Terroirs comparison in terms of biomass flows and nitrogen balances : study case of Diohine and Barry Sine in the former groundnut bassin (Mémoire de master 2). Isara Lyon, Ecole d'ingénieurs de purpan, Norwegian University of Life Sciences.
- Audouin, E., Vayssières, J., Odru, M., Masse, D., Dorégo, G.S., Delaunay, V., Lecomte, P., 2015. Réintroduire l'élevage pour accroître la durabilité des terroirs villageois d'Afrique de l'Ouest: le cas du bassin arachidier au Sénégal, in: Sultan, B., Lalou, R., Oumarou, A., Sanni, M.A., Soumaré, A. (Eds.), *Les Sociétés Rurales Face Aux Changements Environnementaux En Afrique de l'Ouest*. Marseille, pp. 403–427.
- Augusseau, X., 2013. Le terroir à l'épreuve des migrations et des dynamiques agro-pastorales, in: *Dynamiques Rurales Dans Les Pays Du Sud : L'enjeu Territorial*. Presses Universitaires du Mirail, pp. 63–75.

- Axelrod, R.M., 1997. The complexity of cooperation: agent-based models of competition and collaboration, Princeton studies in complexity. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Ayantunde, A.A., Blummel, M., Grings, E., Duncan, A.J., 2014. Price and quality of livestock feeds in suburban markets of West Africa's Sahel: Case study from Bamako, Mali= Prix et qualité des aliments du bétail dans les marchés périurbains du Sahel Ouest africain: étude de cas à Bamako, Mali= Precio y calidad de alimento para ganado en mercados suburbanos en el Sahel de África del Oeste: Análisis de un caso en Bamako, Malí. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* 67.
- Balandier, M.-L., 2017. Describing diversity and crop-livestock integration in smallholder mixed farming systems in Sub-Saharan Africa: An application of network analysis in the former Senegalese Groundnut Basin (Master 2). Wageningen University, Wageningen.
- Barbier, J.-M., Goulet, F., 2013. Moins de technique, plus de nature : pour une heuristique des pratiques d'écologisation de l'agriculture. *Natures Sciences Sociétés* 21, 200–210. <https://doi.org/10.1051/nss/2013094>
- Bassett, T.J., Blanc-Pamard, C., Boutrais, J., 2007. Constructing Locality: The Terroir Approach in West Africa. *Africa* 77, 104–129. <https://doi.org/10.3366/afr.2007.77.1.104>
- Baudron, F., Delmotte, S., Corbeels, M., Herrera, J.M., Tittonell, P., 2015. Multi-scale trade-off analysis of cereal residue use for livestock feeding vs. soil mulching in the Mid-Zambezi Valley, Zimbabwe. *Agricultural Systems* 97–106.
- Belem, M., Manlay, R.J., Müller, J.-P., Chotte, J.-L., 2011. CaTMAS: A multi-agent model for simulating the dynamics of carbon resources of West African villages. *Ecological Modelling* 222, 3651–3661. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.08.024>
- Belem, M., Saqalli, M., 2017. Development of an integrated generic model for multi-scale assessment of the impacts of agro-ecosystems on major ecosystem services in West Africa. *Journal of Environmental Management* 202, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.018>
- Bénagabou, O.I., Blanchard, M., Bougouma Yaméogo, V.M.C., Vayssières, J., Vigne, M., Vall, E., Lecomte, P., Nacro, H.B., 2017. L'intégration agriculture-élevage améliore-t-elle l'efficacité, le recyclage et l'autonomie énergétique brute des exploitations familiales mixtes au Burkina Faso ? *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* 70, 31. <https://doi.org/10.19182/remvt.31479>
- Bennett, N.D., Croke, B.F.W., Guariso, G., Guillaume, J.H.A., Hamilton, S.H., Jakeman, A.J., Marsili-Libelli, S., Newham, L.T.H., Norton, J.P., Perrin, C., Pierce, S.A., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A.A., Fath, B.D., Andreassian, V., 2013. Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software* 40, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>
- Blanchard, M., 2010. Gestion de la fertilité des sols et rôle du troupeau dans les systèmes coton-céréales-élevage au Mali-Sud: savoirs techniques locaux et pratiques d'intégration agriculture élevage. Université Paris-Est.
- Blanchard, M., Vayssières, J., Dugué, P., Vall, E., 2013. Local Technical Knowledge and Efficiency of Organic Fertilizer Production in South Mali: Diversity of Practices. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 37, 672–699. <https://doi.org/10.1080/21683565.2013.775687>
- Bommel, P., Müller, J.-P., 2007. An Introduction to UML for Modelling in the Human and Social Sciences, in: Phan, D., Amblard, F. (Eds.), *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*. GEMAS Studies in Social Analysis.
- Bonauo, T., Bendahan, A.B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., Magda, D., Tichit, M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy* 57, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., Finnveden, G., 2006. Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures* 38, 723–739. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>

- Boserup, E., 1965. The conditions of agricultural growth: The economics of agrarian change under population pressure. Transaction Publishers.
- Bousquet, F., Le Page, C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling* 176, 313–332.
- Brossier, J., Teissier, J.H., Brun, A., Roux, M., Bonnemaire, J., 1995. Pays Paysans Paysages dans les Vosges du sud. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris.
- Burel, F., Baudry, J., 1999. *Ecologie du paysage: concepts, méthodes et applications*. Technique & Documentation, Paris.
- Cabell, J.F., Oelofse, M., 2012. An Indicator Framework for Assessing Agroecosystem Resilience. *Ecology and Society* 17. <https://doi.org/10.5751/ES-04666-170118>
- 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., Boissau, S., Trung, T.N., Quang, D.D., 2005. Agrarian transition and lowland–upland interactions in mountain areas in northern Vietnam: application of a multi-agent simulation model. *Agricultural Systems* 86, 312–332. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2004.11.001>
- Castellanos-Navarrete, A., Tittonell, P., Rufino, M.C., Giller, K.E., 2015. Feeding, crop residue and manure management for integrated soil fertility management – A case study from Kenya. *Agricultural Systems* 134, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2014.03.001>
- Cerf, M., Sébillotte, M., 1997. Approche cognitive des décisions de production dans l’exploitation agricole: Confrontation aux théories de la décision. *Économie rurale* 239, 11–18. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1997.4862>
- Chamberlin, J., Jayne, T.S., Headey, D., 2014. Scarcity amidst abundance? Reassessing the potential for cropland expansion in Africa. *Food Policy* 48, 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.05.002>
- Chirat, G., Groot, J.C.J., Messad, S., Bocquier, F., Ickowicz, A., 2014. Instantaneous intake rate of free-grazing cattle as affected by herbage characteristics in heterogeneous tropical agro-pastoral landscapes. *Applied Animal Behaviour Science* 157, 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2014.06.003>
- Coquillard, P., Hill, D.R.C., 1997. *Modélisation et simulation d’écosystèmes: des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*, Recherche en écologie. Masson, Paris.
- Corbeels, M., de Graaff, J., Ndah, T.H., Penot, E., Baudron, F., Naudin, K., Andrieu, N., Chirat, G., Schuler, J., Nyagumbo, I., Rusinamhodzi, L., Traore, K., Mzoba, H.D., Adolwa, I.S., 2014. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: A multi-scale analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 187, 155–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.011>
- CTFT, 1988. *Faidherbia albida (Del.) A. Chev. Monographie.*, Centre Technique Forestier Tropical. ed. Nogent-sur-Marne, Cedex, France.
- Cushing, J.M., Yicang, Z., 1994. The net reproductive value and stability in matrix population models. *Natural Resources Modeling* 8, 297–333.
- d’Aquino, P., Bah, A., 2013. A bottom-up participatory modelling process for a multi-level agreement on environmental uncertainty management in West Africa. *Journal of Environmental Planning and Management* 2, 271–285. <https://doi.org/10.1080/09640568.2012.665361>
- Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., Milestad, R., 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 545–555. <https://doi.org/10.1051/agro/2009053>
- David, D., Payet, D., Botta, A., Lajoie, G., Manglou, S., Courdier, R., 2007. Un couplage de dynamiques comportementales: le modèle DS pour l’aménagement du territoire. *JFSMA* 7, 129–138.

- de Ridder, N., Sanogo, O.M., Rufino, M.C., van Keulen, H., Giller, K.E., 2015. Milk: the new white gold? Milk production options for smallholder farmers in Southern Mali. *animal* 9, 1221–1229. <https://doi.org/10.1017/S1751731115000178>
- Dedieu, B., Ingrand, S., 2010. Incertitude et adaptation : cadres théoriques et application à l'analyse de la dynamique des systèmes d'élevage. *Inra Productions Animales* 1, 81–90.
- Deffontaines, J.-P., 1997. Du paysage comme moyen de connaissance de l'activité agricole à l'activité agricole comme moyen de production du paysage, in: Blanc-Pamard, C., Boutrais, J. (Eds.), *Thème et Variations : Nouvelles Recherches Rurales Au Sud, Colloques et Séminaires*. ORSTOM, Paris (France), pp. 305–322.
- Defoer, T., De Groote, H., Hilhorst, T., Kante, S., Budelman, A., 1998. Participatory action research and quantitative analysis for nutrient management in southern Mali: A fruitful marriage? *Agriculture, ecosystems & environment* 71, 215–228.
- Delaunay, V. (Ed.), 2017. *La situation démographique dans l'observatoire de Niakhar: 1963-2014*. IRD, Dakar, Sénégal.
- Delaunay, V., Adjamagbo, A., Lalou, R., 2006. Questionner la transition de la fécondité en milieu rural africain: les apports d'une démarche longitudinale et institutionnelle. *Cahiers québécois de démographie* 35, 27–49.
- Delaunay, V., Deschamps-Cottin, M., Bertaudière-Montès, V., Vila, B., Oliveau, S., Dos Santos, S., Soumaré, A., Lalou, R., 2009. Dynamique démographique et dynamique du parc agroforestier à Faidherbia albida (Del.) A. Chev. en pays Serer (Sob, Sénégal), in: UIESP. Presented at the XXVIe Congrès International de la Population de l'UIESP.
- Delaunay, V., Douillot, L., Diallo, A., Dione, D., Trape, J.-F., Medianikov, O., Raoult, D., Sokhna, C., 2013. Profile: The Niakhar Health and Demographic Surveillance System. *Int. J. Epidemiol.* 42, 1002–1011. <https://doi.org/10.1093/ije/dyt100>
- Delon, C., Galy-Lacaux, C., Boone, A., Lioussé, C., Serça, D., Adon, M., Diop, B., Akpo, A., Lavenu, F., Mougin, E., others, 2010. Atmospheric nitrogen budget in Sahelian dry savannas. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 2691–2708.
- Depommier, D., Guérin, H., 1996. Emondage traditionnel de Faidherbia albida. Production fourragère, valeur nutritive et récolte de bois à Dossi et Watinoma (Burkina Faso). *Cahiers scientifiques du Cirad-Forêt, Les parcs à Faidherbia (Acacia albida Parklands)* 55–84.
- Descheemaeker, K., Oosting, S.J., Homann-Kee Tui, S., Masikati, P., Falconnier, G.N., Giller, K.E., 2016. Climate change adaptation and mitigation in smallholder crop–livestock systems in sub-Saharan Africa: a call for integrated impact assessments. *Regional Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0957-8>
- Diarisso, T., Corbeels, M., Andrieu, N., Djamen, P., Tittonell, P., 2015. Biomass transfers and nutrient budgets of the agro-pastoral systems in a village territory in south-western Burkina Faso. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9679-4>
- Dingkuhn, M., Baron, C., Bonnal, V., Maraux, F., Sarr, B., Sultan, B., Clopes, A., Forest, F., 2003. SARRA-H, in: *Decision Support Tools for Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa: A Practical Guide*. IFDC, pp. 127–139.
- Dongmo, A.-L., Vall, E., Diallo, M.A., Dugue, P., Njoya, A., Lossouarn, J., 2012. Herding territories in Northern Cameroon and Western Burkina Faso: spatial arrangements and herd management. *Pastoralism: Research, Policy and Practice* 2, 1.
- Dongmo, A.L., Vall, E., Dugué, P., Liba'a, N.K., Bechir, A.B., Lossouarn, J., 2010. Le territoire d'élevage: diversité, complexité et gestion durable en Afrique soudano-sahélienne, in: *Savanes Africaines En Développement: Innover Pour Durer*, Actes Du Colloque, Prasac, N'Djaména, Tchad.

- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., Tiftonell, P., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy* 34, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.006>
- Dounias, I., Aubry, C., 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, 233–260.
- Drechsel, P., Gyiele, L., Kunze, D., Cofie, O., 2001. Population density, soil nutrient depletion, and economic growth in sub-Saharan Africa. *Ecological economics* 38, 251–258.
- Dubois, J.-P., 1974. *Les Serer et la question des Terres Neuves au Sénégal*. Centre ORSTOM de Dakar.
- Dufumier, M., Bainville, S., 2006. Le développement agricole du Sud-Mali face au désengagement de l'État. *Afrique contemporaine* 217, 121. <https://doi.org/10.3917/afco.217.0121>
- Dugué, P., 1998. Gestion de la fertilité et stratégies paysannes : le cas des zones de savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre. *Agriculture et Développement* 18, 13–20.
- Dugué, P., Vayssières, J., Chia, E., Ouedraogo, S., Havard, M., others, 2011. L'intensification écologique : réflexions pour la mise en pratique de ce concept dans les zones de savane d'Afrique de l'Ouest, in: Vall, E., Andrieu, N., Chia, E., Nacro, H.B. (Eds.), *Séminaire ASAP*. CIRAD, Bobo-Dioulasso.
- Dugy, T., 2015. Diagnostic des flux de biomasse à l'échelle de terroirs agro-sylvopastoraux et représentation de leur état & fonctionnement : Etude comparative des terroirs de Sob, Dihine et Barry Sine dans l'Ancien Bassin Arachidier au Sénégal (Mémoire d'ingénieur (master 2)). ISTOM, Cergy Pontoise.
- Duncan, A.J., Tarawali, S.A., Thorne, P.J., Valbuena, D., Descheemaeker, K., Tui, S.H.-K., 2013. Integrated crop-livestock systems - a key to sustainable intensification in Africa. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales* 1, 202–206.
- Edmonds, B., Moss, S., 2004. From KISS to KIDS—an 'anti-simplistic' modelling approach, in: *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*. Springer, pp. 130–144.
- Edwards-Jones, G., 2006. Modelling farmer decision-making: concepts, progress and challenges. *Animal Science* 82, 783. <https://doi.org/10.1017/ASC2006112>
- Falconnier, G.N., Descheemaeker, K., Van Mourik, T.A., Sanogo, O.M., Giller, K.E., 2015. Understanding farm trajectories and development pathways: Two decades of change in southern Mali. *Agricultural Systems* 139, 210–222. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.07.005>
- FAO, 2001a. Chapter 2 Characterization of mixed farms, in: *Mixed Crop-Livestock Farming : A Review of Traditional Technologies Based on Literature and Field Experience*, Animal Production and Health Paper.
- FAO, 2001b. *Pastoralism in the new millennium*, Animal Production and Health. Rome (Italie).
- FAO, 2001c. Chapter 6 Crop-livestock technologies, in: *Mixed Crop-Livestock Farming : A Review of Traditional Technologies Based on Literature and Field Experience*, Animal Production and Health Paper.
- Fath, B.D., Scharler, U.M., Ulanowicz, R.E., Hannon, B., 2007. Ecological network analysis: network construction. *Ecological Modelling* 208, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.04.029>
- Ferber, J., 1995. *Les Systèmes Multi Agents : vers une intelligence collective*.
- Fountas, S., Wulfsohn, D., Blackmore, B.S., Jacobsen, H.L., Pedersen, S.M., 2006. A model of decision-making and information flows for information-intensive agriculture. *Agricultural Systems* 87, 192–210. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.12.003>
- Freschet, G., Masse, D., Hien, E., Sall, S., Chotte, J., 2008. Long-term changes in organic matter and microbial properties resulting from manuring practices in an arid cultivated soil in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 123, 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.05.012>

- Friot, D., Guérin, H., 2005. *Acacia senegal*, arbre fourrager sahélien? *Bois et Forêts des Tropiques* 2.
- Gangneron, F., Robert, E., 2015. Droits au sol et gestion de la fertilité. Deux perspectives différentes : Djougou (Bénin) et Niakhar (Sénégal), in: Sultan, B., Lalou, R., Amadou Sanni, M., Oumarou, A., Soumaré, M.A. (Eds.), *Les Sociétés Rurales Face Aux Changements Climatiques et Environnementaux En Afrique de l'Ouest*, Collection Synthèses. IRD éditions, Marseille, pp. 249–268.
- Ganry, F., Feller, C., Harmand, J.-M., Guibert, H., 2001. Management of soil organic matter in semiarid Africa for annual cropping systems. *Nutrient cycling in agroecosystems* 61, 105–118.
- Garcia, L., 2015. Impact du changement climatique sur les rendements du mil et de l'arachide au Sénégal : Approche par expérimentation virtuelle (Mémoire d'ingénieur (master 2)). Montpellier SupAgro, Montpellier.
- Garin, P., Faye, A., Lericollais, A., Sissokho, M., 1990. Evolution du rôle du bétail dans la gestion de la fertilité des terroirs sereer au Sénégal. *Les cahiers de la Recherche-Développement* 26, 65–84.
- Gaudou, B., Sibertin-Blanc, C., Therond, O., Amblard, F., Auda, Y., Arcangeli, J.-P., Balestrat, M., Charron-Moirez, M.-H., Gondet, E., Hong, Y., others, 2014. The MAELIA multi-agent platform for integrated assessment of low-water management issues, in: *International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation-MABS 2013*. p. pp–85.
- Giller, K.E., Rowe, E.C., de Ridder, N., van Keulen, H., 2006. Resource use dynamics and interactions in the tropics: Scaling up in space and time. *Agricultural Systems* 88, 8–27. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.06.016>
- Gonin, A., 2016. Les éleveurs face à la territorialisation des brousses: repenser le foncier pastoral en Afrique de l'Ouest, in: *Annales de Géographie*. Armand Colin, pp. 28–50.
- Grange, G., 2015. Suivi du cycle de l'azote en fermes réelles : Cas des systèmes agropastoraux du bassin arachidier du Sénégal (Ingénieur agronome). Montpellier SupAgro, Montpellier.
- Grignard, A., Taillandier, P., Gaudou, B., Vo, D.A., Huynh, N.Q., 2013. GAMA 1.6 : Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation, in: Boella, G., Elkind, E., Savarimuthu, B.T.R., Dignum, F., Purvis, M.K. (Eds.), *PRIMA 2013: Principles and Practice of Multi-Agent Systems*. Presented at the 16th International Conference, Dunedin, New Zealand.
- Grillot, M., Guerrin, F., Gaudou, B., Masse, D., Vayssières, J., forthcoming. Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model.
- Grimm, V., 2005. Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based Complex Systems: Lessons from Ecology. *Science* 310, 987–991. <https://doi.org/10.1126/science.1116681>
- Grimm, V., Polhill, G., Touza, J., 2013. Documenting Social Simulation Models: The ODD Protocol as a Standard - Chapter 7, in: Edmonds, B., Meyer, R. (Eds.), *Simulating Social Complexity: A Handbook, Understanding Complex Systems*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 117–133.
- Guerrin, F., 2009. Dynamic simulation of action at operations level. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 18, 156–185. <https://doi.org/10.1007/s10458-008-9060-y>
- Guerrin, F., 2007. Représentation des connaissances pour la décision et l'action (Mémoire d'habilitation à diriger des recherches). Université de la Réunion, La Réunion.
- Guichard, L., Kergoat, L., Hourdin, F., Léauthaud, C., Barbier, J., Mougin, E., Diarra, B., 2015. Le réchauffement climatique observé depuis 1950 au Sahel, in: Sultan, B., Lalou, R., Amadou Sanni, M., Oumarou, A., Soumaré, M.A. (Eds.), *Les Sociétés Rurales Face Aux Changements Climatiques et Environnementaux En Afrique de l'Ouest*, Collection Synthèses. IRD éditions, Marseille, pp. 23–42.
- Guigou, B., 1999. Chap5. La composition familiale du groupe domestique, in: *Paysans sereer: dynamiques agraires et mobilités au Sénégal*. Editions d'IRD (ex-Orstom), Paris, pp. 196–203.
- Guigou, B., Lericollais, A., 1992. Crise de l'agriculture et marginalisation économique des femmes sereer siin. *Sociétés-Espaces-Temps* 45–64.

- Hailelassie, A., Priess, J.A., Veldkamp, E., Lesschen, J.P., 2007. Nutrient flows and balances at the field and farm scale: Exploring effects of land-use strategies and access to resources. *Agricultural Systems* 94, 459–470. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.11.013>
- Headey, D.D., Jayne, T.S., 2014. Adaptation to land constraints: Is Africa different? *Food Policy* 48, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.05.005>
- Herrero, M., Havlik, P., Valin, H., Notenbaert, A., Rufino, M.C., Thornton, P.K., Blummel, M., Weiss, F., Grace, D., Obersteiner, M., 2013. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 20888–20893. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308149110>
- Herrero, M., Henderson, B., Havlík, P., Thornton, P.K., Conant, R.T., Smith, P., Wiersenius, S., Hristov, A.N., Gerber, P., Gill, M., Butterbach-Bahl, K., Valin, H., Garnett, T., Stehfest, E., 2016. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/nclimate2925>
- Herrero, M., Thornton, P.K., Kruska, R., Reid, R.S., 2008. Systems dynamics and the spatial distribution of methane emissions from African domestic ruminants to 2030. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 126, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.017>
- Herrero, M., Thornton, P.K., Notenbaert, A., Msangi, S., Wood, S., Kruska, R., Dixon, J., Bossio, D., Van de Steeg, J.A., Freeman, H.A., Li, X., ParthasarathyRao, P., 2012. Drivers of change in crop–livestock systems and their potential impacts on agro-ecosystems services and human wellbeing to 2030. ILRI.
- Herrero, M., Thornton, P.K., Notenbaert, A.M., Wood, S., Msangi, S., Freeman, H.A., Bossio, D., Dixon, J., Peters, M., van de Steeg, J., Lynam, J., Rao, P.P., Macmillan, S., Gerard, B., McDermott, J., Sere, C., Rosegrant, M., 2010. Smart Investments in Sustainable Food Production: Revisiting Mixed Crop–Livestock Systems. *Science* 327, 822–825. <https://doi.org/10.1126/science.1183725>
- Hervé, D., Castella, J.-C., 2009. Espaces, temps, acteurs : regards d’agronomes, in: Hervé, D., Laloë, F. (Eds.), *Modélisation de l’environnement: Entre Natures et Sociétés, Indisciplines*. Quae, Versailles, pp. 93–112.
- Hiernaux, P., Fernández-Rivera, S., Schlecht, E., Turner, M.D., Williams, T.O., 1997. Livestock-mediated nutrient transfers in Sahelian agro-ecosystems, in: *Soil Fertility Management in West Africa Land Use Systems*. Niamey, Niger, pp. 339–347.
- Huss, H.H., 1999. Composition chimique, in: *La Qualité et Son Évolution Dans Le Poisson Frais, Document Technique Sur Les Pêches*. FAO, Département des pêches, Rome.
- Ickowicz, A., Mbaye, M., 2001. Forêts soudaniennes et alimentation des bovins au Sénégal : potentiel et limites. *Bois et Forêts des Tropiques* 4, 47–61.
- Jahel, C., 2016. Analyse des dynamiques des agroécosystèmes par modélisation spatialisée et utilisation d’images satellitaires: Cas d’étude de l’ouest du Burkina Faso (Doctorat). AgroParisTech, Montpellier.
- Jahel, C., Baron, C., Vall, E., Karambiri, 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*. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.016>
- Jayne, T.S., Chamberlin, J., Headey, D.D., 2014. Land pressures, the evolution of farming systems, and development strategies in Africa: A synthesis. *Food Policy* 48, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.05.014>
- Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., Wheeler, T.R., 2017. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural Systems* 155, 269–288. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.021>

- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18, 235–265.
- Josserand, H., da Silva, A., 2002. Rapport spécial - Mission FAO/PAM D'ÉVALUATION DES RÉCOLTES ET DES APPROVISIONNEMENTS ALIMENTAIRES AU SÉNÉGAL.
- Jouve, P., 2006. Transition agraire: la croissance démographique, une opportunité ou une contrainte? *Afrique contemporaine* 217, 43–54. <https://doi.org/10.3917/afco.217.54>
- Jung, G., 1969. Cycles biogéochimiques dans un écosystème de région tropicale sèche *Acacia albida* (Del.) sol ferrugineux tropical peu lessivé (dior) (Note préliminaire).
- Kamuanga, M., Somda, J., Sanon, Y., Kagoné, H., 2008. Élevage et marché régional au Sahel et en Afrique de l'Ouest : Potentialités et défis. Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest/OCDE.
- Kelly, R.A., Jakeman, A.J., Barreteau, O., Borsuk, M.E., ElSawah, S., Hamilton, S.H., Henriksen, H.J., Kuikka, S., Maier, H.R., Rizzoli, A.E., van Delden, H., Voinov, A.A., 2013. Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling & Software* 47, 159–181. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.005>
- Lalou, R., Delaunay, V., 2015. Migrations saisonnières et changement climatique en milieu rural sénégalais. Forme ou échec de l'adaptation ?, in: Sultan, B., Lalou, R., Amadou Sanni, M., Oumarou, A., Soumaré, M.A. (Eds.), *Les Sociétés Rurales Face Aux Changements Climatiques et Environnementaux En Afrique de l'Ouest*, Collection Synthèses. IRD éditions, Marseille, pp. 287–314.
- Lambin, E.F., Turner, B.L., Geist, H.J., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O.T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., others, 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11, 261–269.
- Landais, E., 1992. Les trois pôles des systèmes d'élevage. *Les cahiers de la Recherche-Développement* 32, 3.
- Landais, E., Lhoste, P., Guérin, H., 1991. Systèmes d'élevage et transferts de fertilité, in: *Savanes d'Afrique Terres Fertiles ? Comment Produire plus et de Façon Durable En Zone de Savanes Au Sud Du Sahara*, Rencontres Internationales. Paris, pp. 219–270.
- Le Page, C., Bazile, D., Becu, N., Bommel, P., Bousquet, F., Etienne, M., Mathevet, R., Souchère, V., Trébuil, G., Weber, J., 2013. Agent-Based Modelling and Simulation Applied to Environmental Management - Chapter 19, in: Edmonds, B., Meyer, R. (Eds.), *Simulating Social Complexity: A Handbook, Understanding Complex Systems*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 499–540.
- Le, Q.B., Park, S.J., Vlek, P.L., 2010. Land Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system: 2. Scenario-based application for impact assessment of land-use policies. *Ecological Informatics* 5, 203–221.
- Le Thiec, G., 1996. *Agriculture africaine et traction animale*. Cirad, Montpellier, France.
- Leclerc, G., Sy, O., 2011. Des indicateurs spatialisés des transhumances pastorales au Ferlo. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Lemmens, R., Louppe, D., Oteng-Amoako, A., 2012. *Prota : Ressources végétales de l'Afrique tropicale - Bois d'oeuvre 2*, CTA Prota. ed. Wageningen.
- Lericollais, A., 1999. *Paysans sereer: dynamiques agraires et mobilités au Sénégal*. Editions d'IRD (ex-Orstom), Paris.
- Lericollais, A., 1970. La détérioration d'un terroir : Sob, en pays Sérèr (Sénégal). *Études rurales* 37, 113–128. <https://doi.org/10.3406/rural.1970.1519>
- Lericollais, A., Faye, A., 1994. Des troupeaux sans pâturages en pays sereer au Senegal, in: Blanc-Pamard, C., Boutrais, J. (Eds.), *A La Croisée Des Parcours : Pasteurs, Éleveurs, Cultivateurs, Congrès: Dynamique Des Systèmes Agraires*. Paris, France, pp. 165–196.

- Lericollais, A., Milleville, P., 1993. La jachère dans les systèmes agro-pastoraux Sereer au Sénégal, in: Floret, C., Serpantié, G. (Eds.), *La jachère en Afrique de l'Ouest*, Colloques et Séminaires. ORSTOM, Paris, pp. 133–145.
- Lericollais, A., Milleville, P., Pontié, G., 1999. Les pratiques paysannes dans le Sine (Chapitre 6), in: Lericollais, A. (Ed.), *Paysans sereer: dynamiques agraires et mobilités au Sénégal*. Editions d'IRD (ex-Orstom), Paris, pp. 210–298.
- Lericollais, A., Ramond, C., 1970. Sob en pays Serer : observations agricoles 1965 1966 1967 1968 1969.
- Lhoste, P., 1987. L'association agriculture-élevage: évolution du système agropastoral au Sine-Saloum, Sénégal, Etudes et synthèses de l'I.E.M.T.V. Institut d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux, Maisons-Alfort, France.
- Lhoste, P., Havard, M., Vall, É., 2010. La traction animale. Quae.
- Lompo, F., Bonzi, M., Zougmore, R., Youl, S., 2000. Rehabilitating soil fertility in Burkina Faso, in: *Nutrients on the Move: Soil Fertility Dynamics in African Farming Systems*. Drylands Programme, International Institute for Environment and Development, London, pp. 103–118.
- Magrin, G., Ninot, O., Cesaro, J.-D., 2011. L'élevage pastoral au Sénégal entre pression spatiale et mutation commerciale. *Mappe Monde*.
- Malthus, T., 1798. *An essay on the principle of population*, J. Johnson. ed. St. Paul's Church-Yard, Londres.
- Manlay, R.J., Ickowicz, A., Masse, D., Feller, C., Richard, D., 2004a. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna—II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural Systems* 79, 83–107. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00054-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00054-4)
- Manlay, R.J., Ickowicz, A., Masse, D., Floret, C., Richard, D., Feller, C., 2004b. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna — I. Element pools and structure of a mixed-farming system. *Agricultural Systems* 79, 55–81. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00053-2)
- Marchal, J.-Y., 1983. *La dynamique d'un espace rural soudano sahelien*. ORSTOM.
- Martin, G., Felten, B., Duru, M., 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling & Software* 26, 1442–1453.
- Matthews, R., 2006. The People and Landscape Model (PALM): Towards full integration of human decision-making and biophysical simulation models. *Ecological Modelling* 194, 329–343. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.10.032>
- Matthews, R.B., Gilbert, N.G., Roach, A., Polhill, J.G., Gotts, N.M., 2007. Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecol* 22, 1447–1459. <https://doi.org/10.1007/s10980-007-9135-1>
- Mazoyer, M., Roudart, L., 1997. Pourquoi une théorie des systèmes agraires? *Cahiers Agricultures* 6, 591–595.
- McCown, R.L., 2002. Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects. *Agricultural Systems* 74, 179–220.
- Mellor, J.W., 2014. High rural population density Africa – What are the growth requirements and who participates? *Food Policy* 48, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.03.002>
- Mermet, L., Billé, R., Leroy, M., Narcy, J.-B., Poux, X., 2005. L'analyse stratégique de la gestion environnementale: un cadre théorique pour penser l'efficacité en matière d'environnement. *Natures sciences sociétés* 13, 127–137.
- Mertz, O., Mbow, C., Reenberg, A., Genesio, L., Lambin, E.F., D'haen, S., Zorom, M., Rasmussen, K., Diallo, D., Barbier, B., Moussa, I.B., Diouf, A., Nielsen, J.Ø., Sandholt, I., 2011. Adaptation strategies and climate vulnerability in the Sudano-Sahelian region of West Africa. *Atmospheric Science Letters* 12, 104–108. <https://doi.org/10.1002/asl.314>

- Moulin, C.H., Coulibaly, D., Pocard-Chapuis, R., Corniaux, C., 2005. Mise au point d'un protocole d'enquête rétrospective et de traitement de l'information, Guide méthodologique pour l'analyse des changements dans les unités de production commercialisant du lait en zone urbaine au Mali.
- Moulin, C.H., Ingrand, S., Lasseur, J., Madelrieux, S., Napoléone, M., Pluvinage, J., Thénard, V., 2008. Comprendre et analyser les changements d'organisation et de conduite de l'élevage dans un ensemble d'exploitations: propositions méthodologiques., in: *L'élevage En Mouvement: Flexibilité et Adaptation Des Exploitations d'herbivores*, Update Sciences et Technologies , 1. Éd. Quae, Versailles, pp. 181–196.
- Muller, B., Lalou, R., Kouakou, P., Soumaré, M.A., Bourgoïn, J., Dorégo, S., Sine, B., 2015. Le retour du mil sanio dans le Sine. Une adaptation raisonnée à l'évolution climatique, in: Sultan, B., Lalou, R., Amadou Sanni, M., Oumarou, A., Soumaré, M.A. (Eds.), *Les Sociétés Rurales Face Aux Changements Climatiques et Environnementaux En Afrique de l'Ouest*, Collection Synthèses. IRD éditions, Marseille, pp. 377–402.
- Murray, J., Burt, J.R., 2001. The composition of fish, Torry advisory note. FAO, Ministry of technology.
- Naudin, K., Bruelle, G., Salgado, P., Penot, E., Scopel, E., Lubbers, M., de Ridder, N., Giller, K.E., 2015. Trade-offs around the use of biomass for livestock feed and soil cover in dairy farms in the Alaotra lake region of Madagascar. *Agricultural Systems* 134, 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.03.003>
- Ndiaye, M.L., Soti, V., Vayssières, J., Masse, D., 2016. Analyse par télédétection de la dynamique d'occupation du sol dans trois terroirs villageois du vieux bassin arachidier au Sénégal sur la période 1968-2016. CIRAD, IRD, CSE, Dakar, Sénégal.
- Nowak, B., Nesme, T., David, C., Pellerin, S., 2015. Nutrient recycling in organic farming is related to diversity in farm types at the local level. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 204, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.010>
- Nozières, M.O., Moulin, C.H., Dedieu, B., 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *animal* 5, 1442–1457. <https://doi.org/10.1017/S1751731111000486>
- Odru, M., 2013. Flux de biomasse et renouvellement de la fertilité des sols à l'échelle du terroir (Diohine) (Mémoire d'ingénieur (master 2)). ISTOM, Cergy Pontoise.
- Ouedraogo, D., 2007. Les dynamiques démographiques (Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest), Série Population. CEDEAO-CSAO/OCDE.
- Pacaud, T., 2007. Modélisation des systèmes d'élevage: synthèse bibliographique (Transformation de l'élevage et dynamique des espaces).
- Pélissier, P., 1966. Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance, Version électronique parue en 2008 par l'UCAD, Dakar - département Histoire. Imprimerie Fabrègue Saint Yrieux.
- Perret, C., 2008. Le climat et les changements climatiques (Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest), Série Environnement. CEDEAO-CSAO/OCDE.
- Picault, S., 2013. De la simulation multi-agents à la simulation multi-niveaux: pour une réification des interactions (Habilitation à Diriger les Recherches). Université Lille I, Lille.
- Pieri, C., 1989. Fertilité des terres de savanes : bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara. CIRAD-IRAT, Montpellier, France.
- Powell, J.M., Fernández-Rivera, S., Hiernaux, P., Turner, M.D., 1996. Nutrient cycling in integrated rangeland/cropland systems of the Sahel. *Agricultural Systems* 52, 143–170.
- Powell, J.M., Pearson, R.A., Hiernaux, P., 2004. Crop–Livestock Interactions in the West African Drylands. *Agronomy Journal* 96, 469. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0469>

- Pretty, J., Toulmin, C., Williams, S., 2011. Sustainable intensification in African agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability* 9, 5–24. <https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0583>
- Ramisch, J.J., 2005. Inequality, agro-pastoral exchanges, and soil fertility gradients in southern Mali. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105, 353–372. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.02.001>
- Refsgaard, J.C., Henriksen, H.J., 2004. Modelling guidelines—terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources* 27, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2003.08.006>
- Ricome, A., Affholder, F., Gérard, F., Muller, B., Poeydebat, C., Quirion, P., Sall, M., 2017. Are subsidies to weather-index insurance the best use of public funds? A bio-economic farm model applied to the Senegalese groundnut basin. *Agricultural Systems* 156, 149–176. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.015>
- Roquet, D., 2008. Partir pour mieux durer : la migration comme réponse à la sécheresse au Sénégal ? *Espace, populations, sociétés* 37–53.
- Rufino, M.C., Dury, J., Tittonell, P., van Wijk, M.T., Herrero, M., Zingore, S., Mapfumo, P., Giller, K.E., 2011. Competing use of organic resources, village-level interactions between farm types and climate variability in a communal area of NE Zimbabwe. *Agricultural Systems* 104, 175–190. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.06.001>
- Rufino, M.C., Hengsdijk, H., Verhagen, A., 2009a. Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 84, 229–247. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9239-2>
- Rufino, M.C., Rowe, E.C., Delve, R.J., Giller, K.E., 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112, 261–282. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.028>
- Rufino, M.C., Tittonell, P., Reidsma, P., López-Ridaura, S., Hengsdijk, H., Giller, K.E., Verhagen, A., 2009b. Network analysis of N flows and food self-sufficiency — a comparative study of crop-livestock systems of the highlands of East and southern Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 85, 169–186. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9256-9>
- Rufino, M.C., Tittonell, P., van Wijk, M.T., Castellanos-Navarrete, A., Delve, R.J., de Ridder, N., Giller, K.E., 2007. Manure as a key resource within smallholder farming systems: Analysing farm-scale nutrient cycling efficiencies with the NUANCES framework. *Livestock Science* 112, 273–287. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.09.011>
- Ruthenberg, H., 1971. *Farming systems in the tropics*. Citeseer.
- Ryschawy, J., Choisis, N., Choisis, J.P., Gibon, A., 2013. Paths to last in mixed crop–livestock farming: lessons from an assessment of farm trajectories of change. *animal* 7, 673–681. <https://doi.org/10.1017/S1751731112002091>
- Ryschawy, J., Choisis, N., Choisis, J.P., Joannon, A., Gibon, A., 2012. Mixed crop-livestock systems: an economic and environmental-friendly way of farming? *animal* 6, 1722–1730. <https://doi.org/10.1017/S1751731112000675>
- Ryschawy, J., Joannon, A., Gibon, A., 2014. L'exploitation de polyculture-élevage : définitions et questions de recherche. *Une revue. Cahiers Agricultures* 23, 346–356. <https://doi.org/10.1684/agr.2014.0727>
- Sanchez, P.A., 2002. Soil fertility and hunger in Africa. *Science* 295, 2019–2020.
- Sanders, L., 2009. Du lieu au territoire, de l'évènement à l'histoire : modèles et échelles, in: Hervé, D., Laloë, F. (Eds.), *Modélisation de l'environnement: Entre Natures et Sociétés, Indisciplines*. Quae, Versailles, pp. 113–129.
- Sanogo, O.M., de Ridder, N., van Keulen, H., 2010. Diversité et dynamique des exploitations agricoles mixtes agriculture-élevage au sud du Mali. *Cahiers Agricultures* 185–193. <https://doi.org/10.1684/agr.2010.0401>

- Saqalli, M., Biolders, C.L., Defourny, P., Gérard, B., 2013. Reconstituting family transitions of Sahelian western Niger 1950-2000: an agent-based modelling approach in a low data context. *Cybergeo*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25760>
- Sarr, O., Diatta, S., Gueye, M., Ndiaye, P.M., Guisse, A., Akpo, L.E., 2013. Importance des ligneux fourragers dans un système agropastoral au Sénégal (Afrique de l'ouest). *Revue Méd. Vétérinaire* 164, 2–8.
- Saunier-Zoltobroda, T., 2015. Flux de biomasse à l'échelle du paysage et hétérogénéité spatiale des bilans d'azote : Cas de trois terroirs du bassin Arachidier au Sénégal (Mémoire d'ingénieur (master 2)). ISTOM, Cergy Pontoise.
- Sautter, G., 1962. A propos de quelques terroirs d'Afrique Occidentale. Essai comparatif. *Études rurales* 4, 24–86. <https://doi.org/10.3406/rural.1962.996>
- Schiere, J.B., De Wit, J., 1995. Livestock and farming systems research II: development and classifications, in: *Cattle, Straw and Systems Control*. Amsterdam, the Netherlands, pp. 39–61.
- Schiere, J.B., Ibrahim, M.N.M., Van Keulen, H., 2002. The role of livestock for sustainability in mixed farming: criteria and scenario studies under varying resource allocation. *Agriculture, ecosystems & environment* 90, 139–153.
- Schilling, R., Gibbons, R., 2002. *Groundnut*, Macmillan Education Ltd. ed, The tropical agriculturist. CTA.
- Schlecht, E., Buerkert, A., Tielkes, E., Bationo, A., 2006. A critical analysis of challenges and opportunities for soil fertility restoration in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 76, 109–136. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-1670-z>
- Schlecht, E., Hiernaux, P., 2004. Beyond adding up inputs and outputs: process assessment and upscaling in modelling nutrient flows. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70, 303–319. <https://doi.org/10.1007/s10705-004-0765-2>
- Sempore, A.W., Andrieu, N., Nacro, H.B., Sedogo, M.P., Le Gal, P.-Y., 2015. Relevancy and role of whole-farm models in supporting smallholder farmers in planning their agricultural season. *Environmental Modelling & Software* 68, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.015>
- Séré, C., Steinfeld, H., 1996. *World Livestock Production systems. Current Status, Issues and Trends* (FAO Animal Production and Health No. 127). FAO, Rome.
- Serpantié, G., Ouattara, B., 2001. Fertilité et jachères en Afrique de l'Ouest, in: Floret, C., Pontanier, R. (Eds.), *La Jachère En Afrique Tropicale*. Paris, pp. 21–83.
- Smaling, E., Nandwa, S.M., Janssen, B.H., 1997. Soil fertility in Africa is at stake. Replenishing soil fertility in Africa 47–61.
- Soussana, J.-F., Lemaire, G., 2014. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 190, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012>
- Sow, F.D., Badiane, A., Maloney, M., 2004. L'embouche paysanne, un exemple d'adaptation de l'élevage traditionnel à la nouvelle situation agricole dans le bassin arachidier du Sénégal. *Cahiers Agricultures* 13, 211–219.
- Stark, F., Fanchone, A., Semjen, I., Moulin, C.-H., Archimède, H., 2016. Crop-livestock integration, from single practice to global functioning in the tropics: Case studies in Guadeloupe. *European Journal of Agronomy* 80, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.004>
- Stoorvogel, J.J., Smaling, E.A., Janssen, B.H., 1993. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales : supranational scale. *Fertilizer research* 35, 227–235.
- Suchman, L.A., 1987. *Plans and Situated Actions: The Problem of Human-Machine Communication*, Cambridge University Press. ed. Cambridge, Royaume-Uni.

- Sultan, B., Lalou, R., Amadou Sanni, M., Oumarou, A., Soumaré, M.A. (Eds.), 2015. Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest, Collection Synthèses. IRD éditions, Marseille.
- Sultan, B., Roudier, P., Quirion, P., Alhassane, A., Muller, B., Dingkuhn, M., Ciais, P., Guimberteau, M., Traore, S., Baron, C., 2013. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters* 8, 014040. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014040>
- Taillandier, P., Grignard, A., Gaudou, B., Drogoul, A., 2014. Des données géographiques à la simulation à base d'agents : application de la plate-forme GAMA. *Cybergeog.* <https://doi.org/10.4000/cybergeog.26263>
- Therond, O., Sibertin-Blanc, C., Lardy, R., Gaudou, B., Balestat, M., Hong, Y., Louail, T., Nguyen, V.B., Panzoli, D., Sanchez-Perez, J.-M., Sauvage, S., Taillandier, P., Vavasseur, M., Mazzega, P., 2014. Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems, in: Ames, D.P., Quinn, N.W., Rizzoli, A.E. (Eds.), *IEMSs 7th: International Congress on Environmental Modelling and Software*. San Diego, California, USA.
- Thornton, P.K., Herrero, M., 2001. Integrated crop–livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment. *Agricultural Systems* 70, 581–602. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00060-9)
- Tittonell, P., Gérard, B., Erenstein, O., 2015. Tradeoffs around crop residue biomass in smallholder crop-livestock systems – What's next? *Agricultural Systems* 134, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.02.003>
- Tittonell, P., Giller, K.E., 2013. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research* 143, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.007>
- Tittonell, P., Rufino, M.C., Janssen, B.H., Giller, K.E., 2010. Carbon and nutrient losses during manure storage under traditional and improved practices in smallholder crop-livestock systems—evidence from Kenya. *Plant and Soil* 328, 253–269. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0107-x>
- Tittonell, P., van Wijk, M.T., Rufino, M.C., Vrugt, J.A., Giller, K.E., 2007a. Analysing trade-offs in resource and labour allocation by smallholder farmers using inverse modelling techniques: A case-study from Kakamega district, western Kenya. *Agricultural Systems* 95, 76–95. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.04.002>
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., de Ridder, N., Giller, K.E., 2007b. Heterogeneity of crop productivity and resource use efficiency within smallholder Kenyan farms: Soil fertility gradients or management intensity gradients? *Agricultural Systems* 94, 376–390. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.10.012>
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P.A., Rowe, E.C., Giller, K.E., 2005. Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya: I. Heterogeneity at region and farm scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 110, 149–165. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.001>
- Tittonell, P., Zingore, S., van Wijk, M.T., Corbeels, M., Giller, K.E., 2007c. Nutrient use efficiencies and crop responses to N, P and manure applications in Zimbabwean soils: Exploring management strategies across soil fertility gradients. *Field Crops Research* 100, 348–368. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.09.003>
- Turner, M.D., McPeak, J.G., Ayantunde, A., 2014. The Role of Livestock Mobility in the Livelihood Strategies of Rural Peoples in Semi-Arid West Africa. *Human Ecology* 42, 231–247. <https://doi.org/10.1007/s10745-013-9636-2>
- United Nations, 2015. *World Population Prospects 2015 – Data Booklet* (No. ST/ESA/SER.A/377). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

- Valbuena, D., Verburg, P.H., Bregt, A.K., 2008. A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 128, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.04.015>
- Vall, E., Dugué, P., Blanchard, M., 2006. Le tissage des relations agriculture-élevage au fil du coton. *Cahiers Agricultures* 15, 72–79.
- Vall, E., Koutou, M., Blanchard, M., Coulibaly, K., Diallo, M.A., Andrieu, N., 2011. Intégration agriculture-élevage et intensification écologique dans les systèmes agrosylvopastoraux de l’Ouest du Burkina Faso, province du Tuy, in: *Partenariat, Modélisation, Expérimentations: Quelles Leçons Pour La Conception de l’innovation et l’intensification Écologique?* Cirad, Bobo-Dioulasso, p. 13–p.
- Vall, E., Marre-Cast, L., Kamgang, H.J., 2017. Chemins d’intensification et durabilité des exploitations de polyculture-élevage en Afrique subsaharienne : contribution de l’association agriculture-élevage. *Cahiers Agricultures* 26, 25006. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017011>
- van Ittersum, M.K., van Bussel, L.G.J., Wolf, J., Grassini, P., van Wart, J., Guilpart, N., Claessens, L., de Groot, H., Wiebe, K., Mason-D’Croz, D., Yang, H., Boogaard, H., van Oort, P.A.J., van Loon, M.P., Saito, K., Adimo, O., Adjei-Nsiah, S., Agali, A., Bala, A., Chikowo, R., Kaizzi, K., Kouressy, M., Makoi, J.H.J.R., Ouattara, K., Tesfaye, K., Cassman, K.G., 2016. Can sub-Saharan Africa feed itself? *Proceedings of the National Academy of Sciences* 201610359. <https://doi.org/10.1073/pnas.1610359113>
- van Wijk, M.T., Tittonell, P., Rufino, M.C., Herrero, M., Pacini, C., Ridder, N. de, Giller, K.E., 2009. Identifying key entry-points for strategic management of smallholder farming systems in sub-Saharan Africa using the dynamic farm-scale simulation model NUANCES-FARMSIM. *Agricultural Systems* 102, 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.07.004>
- Vanlauwe, B., Giller, K., 2006. Popular myths around soil fertility management in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 116, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.016>
- Vayssières, J., 2004. L’appréhension des pratiques décisionnelles d’éleveurs par enquête-immersion : cas des activités à l’origine de flux d’azote en exploitations bovines laitières à la Réunion (Diplôme d’Etudes Approfondies). INAPG (AgroParisTech), Paris.
- Vayssières, J., Blanchard, M., Vigne, M., Masse, D., Albrecht, A., Vall, E., Pocard-Chapuis, R., Corniaux, C., Lecomte, P., 2015. The risk of declines in soil fertility and crop productivity due to decreased livestock presence in agropastoral zones of West Africa, in: Gritti, E.S. (Ed.), *FSD5: International Symposium on Farming System Design*. Montpellier, France, pp. 467–468.
- Vayssières, J., Bocquier, F., Lecomte, P., 2009a. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises. Part II – Interactive simulation of various management strategies with diverse stakeholders. *Agricultural Systems* 101, 139–151.
- Vayssières, J., Guerrin, F., Paillat, J.-M., Lecomte, P., 2009b. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises. Part I – Whole-farm dynamic model. *Agricultural Systems* 101, 128–138.
- Vayssières, J., Lecomte, P., Guerrin, F., Nidumolu, U.B., 2007. Modelling farmers’ action: decision rules capture methodology and formalisation structure: a case of biomass flow operations in dairy farms of a tropical island. *animal* 1, 716–733. <https://doi.org/10.1017/S1751731107696657>
- Vayssières, J., Rufino, M.C., 2012. Managing nutrient cycles in crop and livestock systems with green technologies, in: Boye, J.I., Arcand, Y. (Eds.), *Green Technologies in Food Production and Processing*. Springer US, Boston, MA, pp. 151–182.
- Vayssières, J., Vigne, M., Alary, V., Lecomte, P., 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agricultural Systems, Methods and tools for integrated assessment of sustainability of agricultural systems and land use Conference on Integrated*

- Assessment of Agriculture and Sustainable Development: Setting the Agenda for Science and Policy 104, 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.05.008>
- Vigan, A., Lasseur, J., Benoit, M., Mouillot, F., Eugène, M., Mansard, L., Vigne, M., Lecomte, P., Dutilly, C., 2017. Evaluating livestock mobility as a strategy for climate change mitigation: Combining models to address the specificities of pastoral systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 89–101.
- Villamor, G.B., Van Noordwijk, M., Le, Q.B., Lusiana, B., Matthews, R., Vlek, P.L., 2011. Diversity deficits in modelled landscape mosaics. *Ecological Informatics* 6, 73–82.
- Vischel, T., Lebel, T., Panthou, G., Quantin, G., Rossi, A., Martinet, M., 2015. Le retour d'une période humide au Sahel ? Observations et perspectives, in: *Les Sociétés Rurales Face Aux Changements Climatiques et Environnementaux En Afrique de l'Ouest*. Marseille, pp. 43–60.
- Voiron-Canicio, C., 2012. L'anticipation du changement en prospective et des changements spatiaux en géoprospective. *L'Espace géographique* 41, 99–110.
- Wade, C., 2016. Analyse des flux d'azote en milieu paysan : Cas des systèmes agropastoraux du bassin arachidier du Sénégal (Mémoire d'ingénieur (master 2)). Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture de Thies, Thies, Sénégal.
- Williams, T.O., Hiernaux, P., Fernández-Rivera, S., 1999. Crop-livestock systems in sub-Saharan Africa: Determinants and intensification pathways. Property rights, risk and livestock development in Africa. International Livestock Research Institute, Nairobi, Kenya 132–151.
- Zampaligré, N., Dossa, L.H., Schlecht, E., 2014. Climate change and variability: perception and adaptation strategies of pastoralists and agro-pastoralists across different zones of Burkina Faso. *Regional Environmental Change* 14, 769–783. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0532-5>
- Zampaligré, N., Schlecht, E., 2017. Livestock foraging behaviour on different land use classes along the semi-arid to sub-humid agro-ecological gradient in West Africa. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-9907-y>
- Zingore, S., Murwira, H.K., Delve, R.J., Giller, K.E., 2007. Influence of nutrient management strategies on variability of soil fertility, crop yields and nutrient balances on smallholder farms in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 119, 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.06.019>
- Zonneveld, I.S., 1989. The land unit—a fundamental concept in landscape ecology, and its applications. *Landscape Ecology* 3, 67–86.

Annexe 2. Exemples de distribution spatiale des bilans azotés pour deux SASP simulés

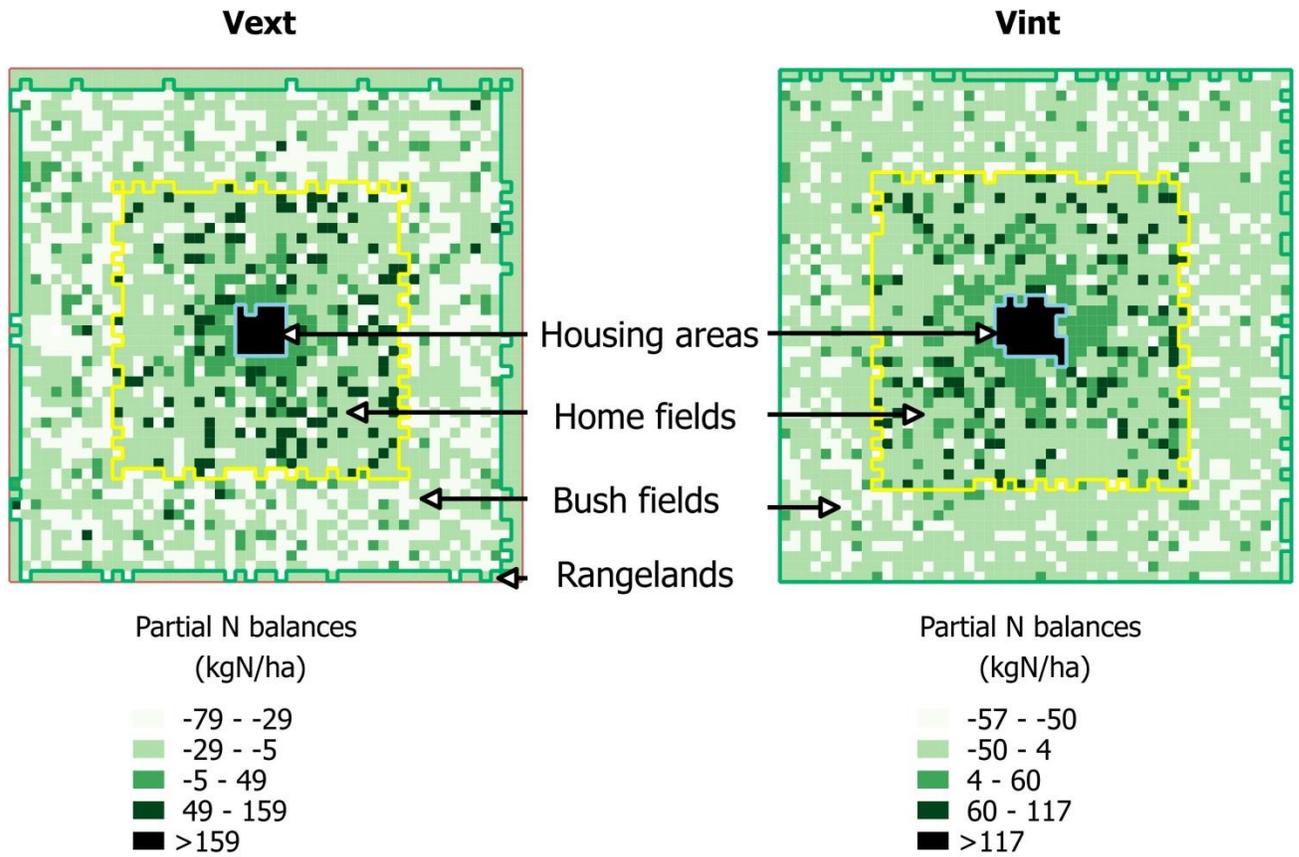


Figure 43. Example of spatial distribution of land plot partial N balances for the 5th year of a simulation for Vext and Vint

Land units are identified by concentric rectangular frames

From the center to the periphery: Housing area (blue outlines), Home fields (yellow), Bush fields (green), Rangelands (red, only in Vext).

Annexe 3. Indicateurs de fonctionnement simulés au niveau du terroir pour les trois trajectoires étudiées

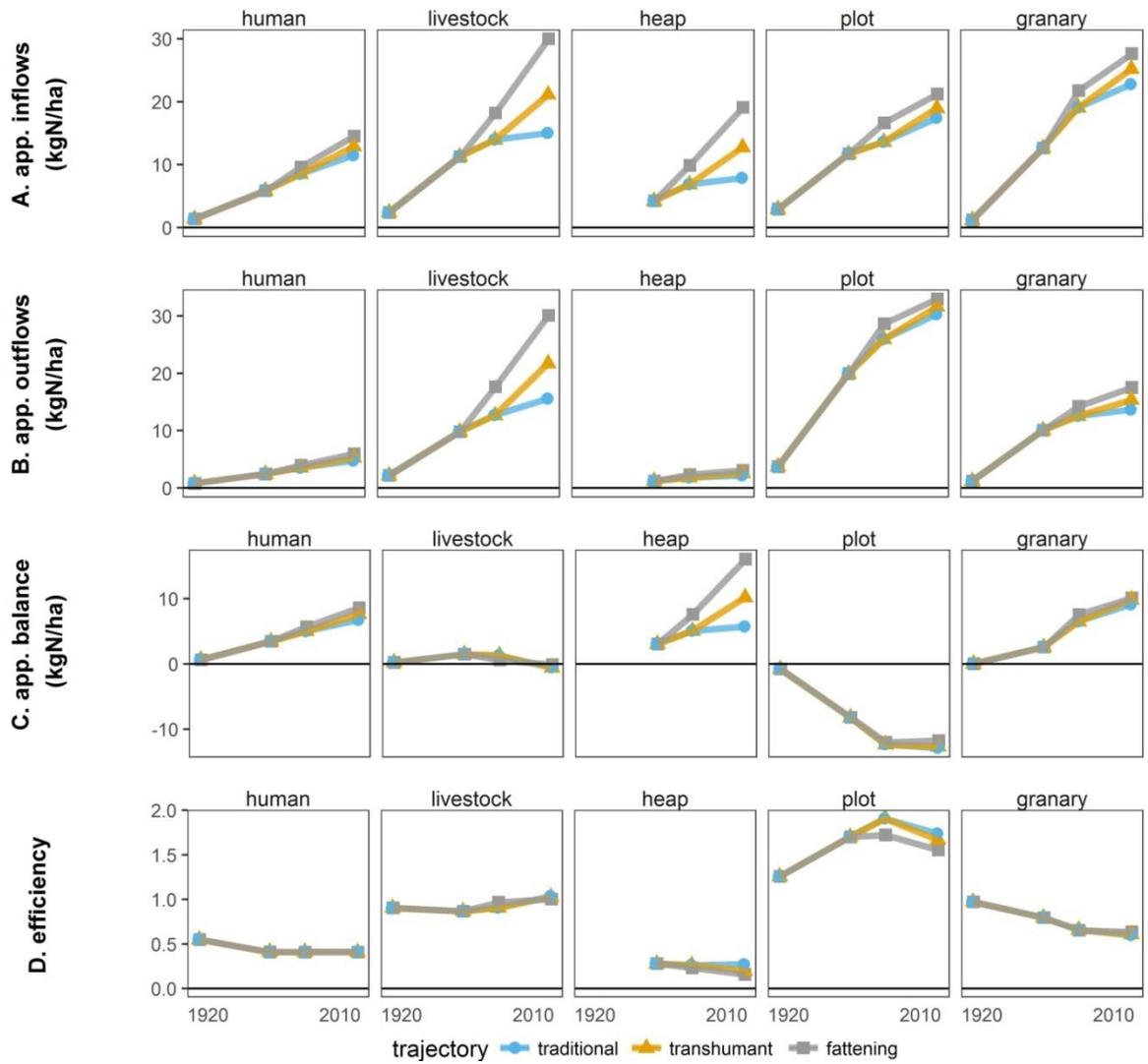


Figure 44. Simulated functioning indicators for each farming activity landscape level

- A. outflows (kgN/ha)
- B. full balance (kgN/ha)
- C. apparent balance (kgN/ha)
- D. efficiency (dimensionless)

Annexe 4. Représentation des flux d’N entre les compartiments « activité agricole » au cours de la transition

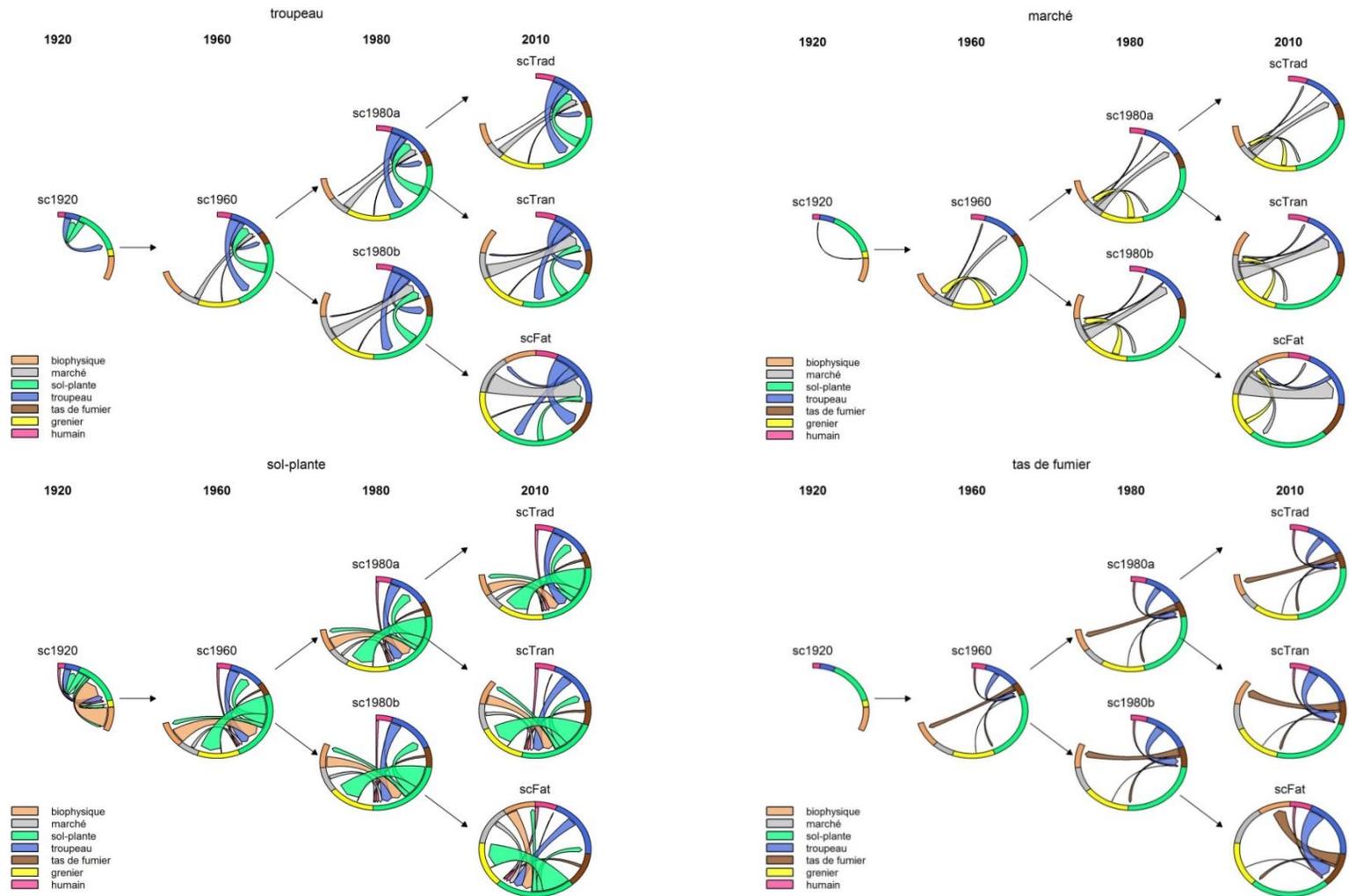


Figure 45. Visualisation centrée par compartiments pour lesquels l’intensité et l’organisation des flux d’N a évolué en haut, troupeau (à gauche) et marché (à droite) et en bas, sol-plante (à gauche) et tas de fumier (à droite)

Dans la [Figure 45](#), on observe une augmentation de l’intensité des flux d’N en provenance du marché en faveur du compartiment troupeau. Concernant les flux d’N en relation avec le compartiment sol-plante (en vert), on observe une grande diversité en termes de compartiments d’origine et destination. Le compartiment fumier apparaît entre 1920 et 1960 (en marron). La quantité de fumier déposée par hectare cultivé, issue du compartiment fumier, demeure stable au cours du temps.

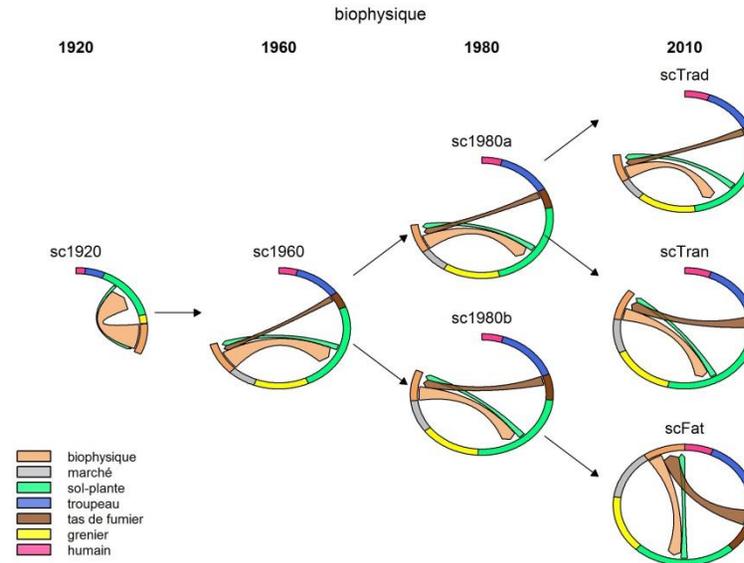


Figure 46. Visualisation centrée sur le compartiment biophysique (flux issus de la fixation de l'N et des pertes dues au lessivage et à la volatilisation)

Dans la Figure 46, on observe une diminution des flux d'N biophysiques en faveur du compartiment sol-plante (en vert) et une augmentation des flux d'N en provenance du compartiment fumier (en marron).

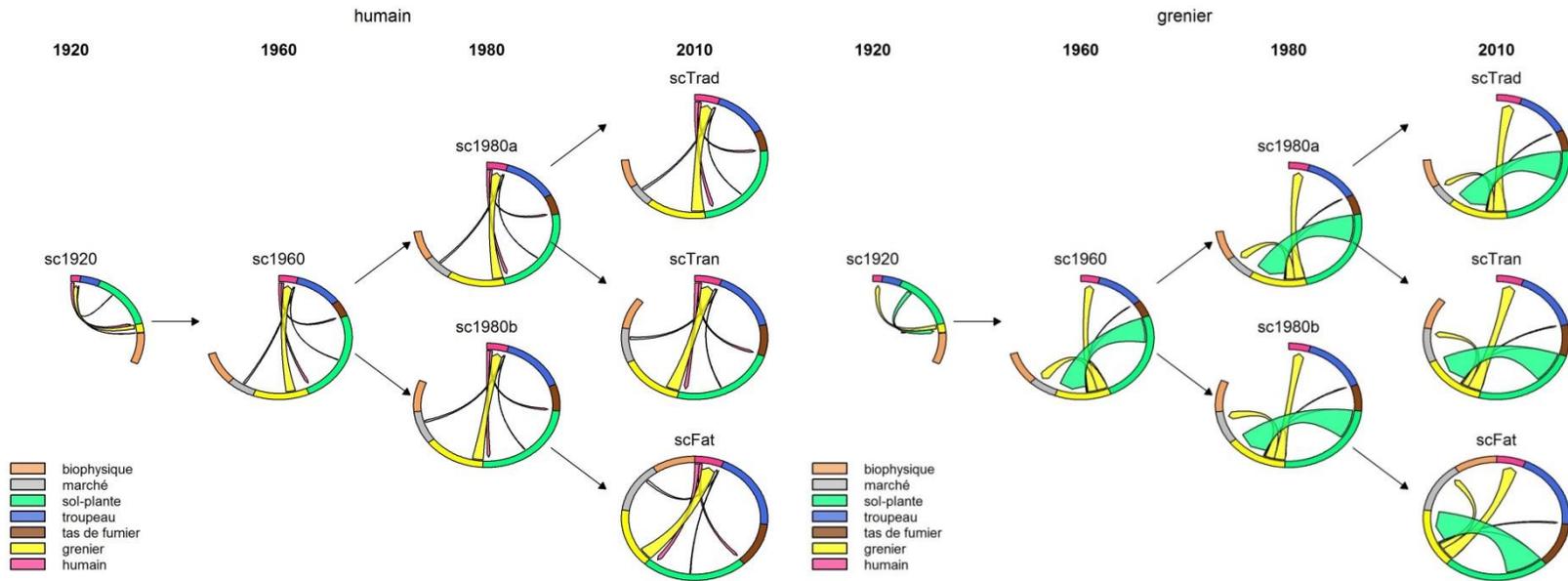


Figure 47. Visualisation centrée par compartiments pour lesquels l'intensité et l'organisation des flux d'N a peu évolué : humain à gauche et grenier à droite

Dans la Figure 47, peu d'évolution dans l'intensité des flux d'N est à noter. L'augmentation de surface cultivée apparaît proportionnelle à l'augmentation des flux d'N.

Annexe 5. Gestion de la biomasse pour l'alimentation des troupeaux

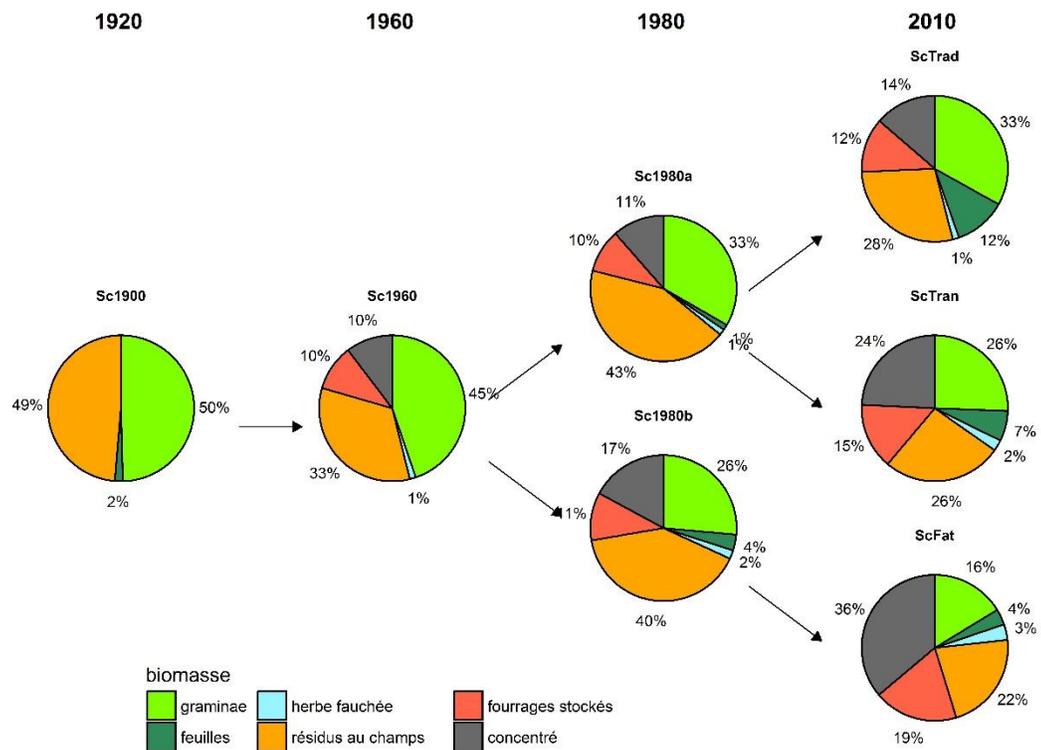


Figure 48. Part des types de biomasses dans l'alimentation des troupeaux (en matière sèche) dans les 3 trajectoires étudiées (traditionnelle, transhumante et embouche)

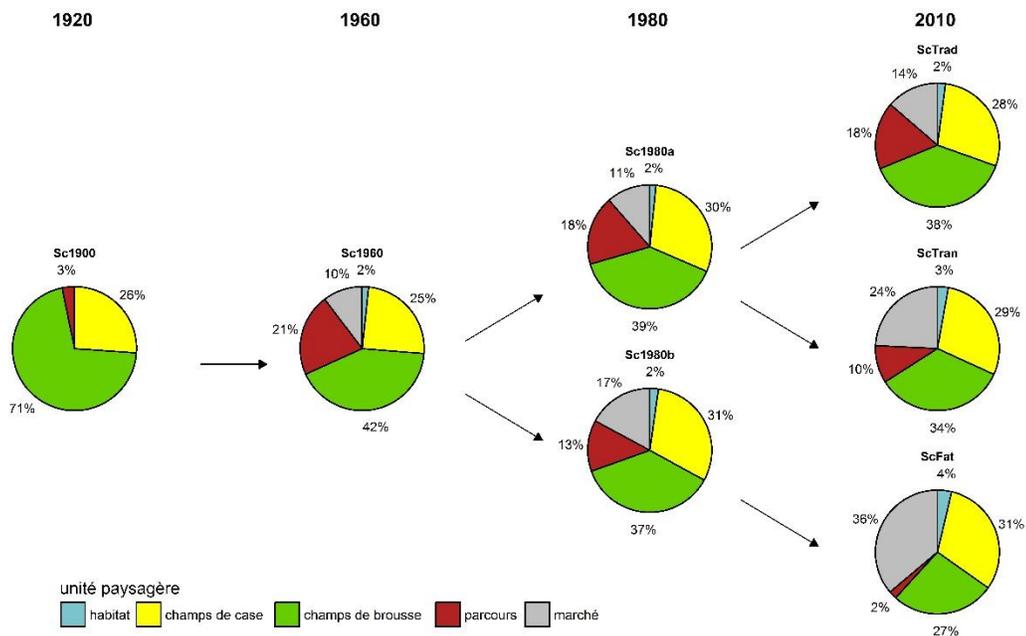


Figure 49. Part des types de unités paysagères dans l'alimentation des troupeaux (en matière sèche) dans les 3 trajectoires étudiées (traditionnelle, transhumante et embouche)

Dans la Figure 48, on voit l'augmentation de la part des aliments concentrés (en gris) dans l'alimentation des troupeaux. Cette augmentation correspond à l'augmentation de la part des marchés (en gris) dans la Figure 49. Ces deux tendances sont d'autant plus marquées pour le scénario qui correspond au SASP où la pratique de l'embouche est la plus développée (ScFat).

Annexe 6. Gestion de la biomasse pour l'alimentation fourragère des troupeaux

Dans la Figure 50, on observe une diminution de la part des herbacées (en vert chartreuse) et de la vaine pâture (en orange) dans l'alimentation des animaux. La part des feuilles (vert foncé) et des fourrages stockés (rouge) augmente dans toutes les trajectoires. Dans la trajectoire « embouche » menant au scénario ScFat, la part de l'herbe fauchée est également en hausse entre 1980 et 2010.

Dans la Figure 51, on observe l'importance des parcours (rouge) dans l'alimentation fourragère des animaux, notamment un maintien entre 1960 et 2010 pour la trajectoire traditionnelle.

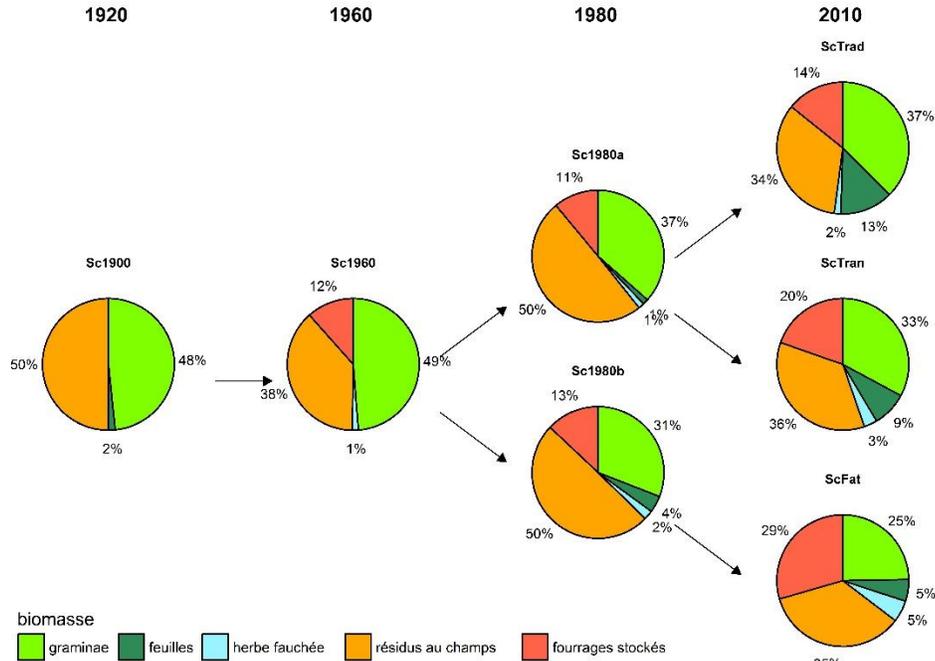


Figure 50. Part des types de biomasses dans l'alimentation fourragère des troupeaux (en matière sèche) dans les 3 trajectoires étudiées (traditionnelle, transhumante et embouche)

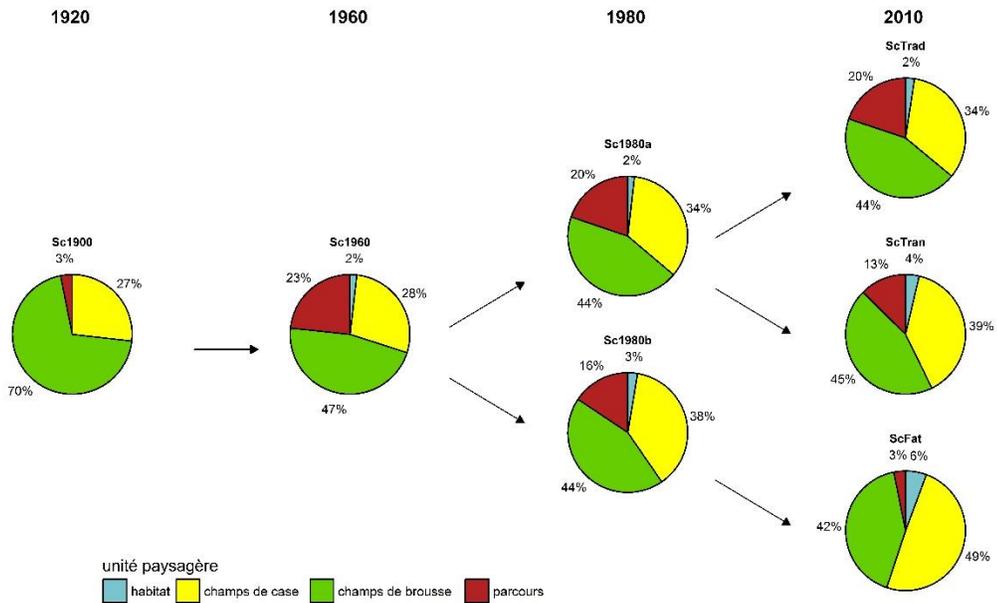


Figure 51. Part des unités paysagères dans l'alimentation fourragère des troupeaux (en matière sèche) dans les 3 trajectoires étudiées (traditionnelle, transhumante et embouche)

NB : le stockage des pailles s'effectue dans les champs de case, celui des fanes d'arachide dans les habitats

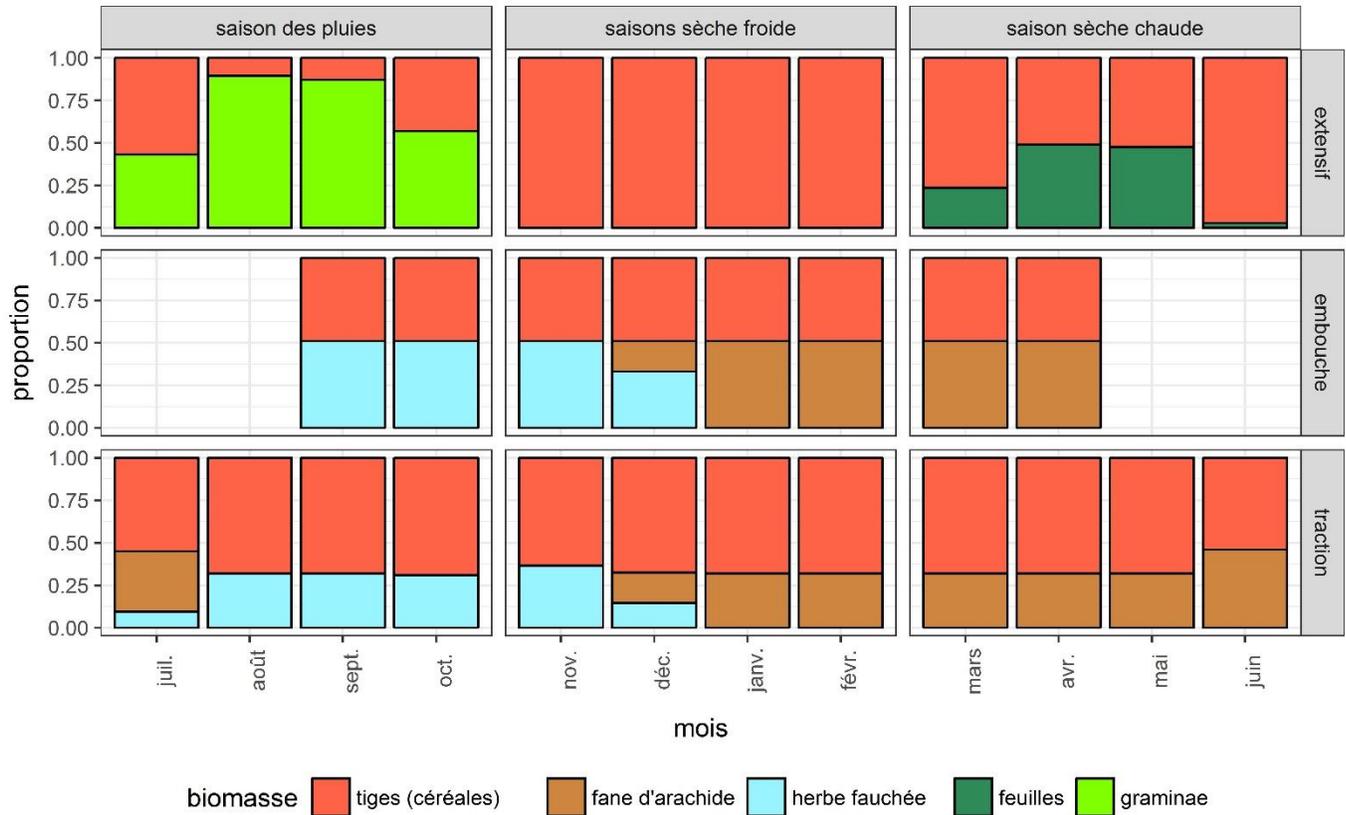


Figure 52. Evolution de la part des biomasses dans l'alimentation fourragère des troupeaux (en matière sèche) au cours d'une année pour le scénario ScTrad

Dans la Figure 52 on voit l'importance de la paille (tiges de céréales en rouge) dans l'alimentation fourragère des troupeaux. Pour les troupeaux en pâturage, l'apport des graminées (en vert chartreux) est faible et centrée sur la saison des pluies. Les ligneux (feuilles, en vert foncé) sont très utilisés comme compléments durant la saison sèche chaude. Pour les animaux à l'étable (traction et embouche), 25 à 50% de l'alimentation fourragère provient de l'herbe en vert (bleu clair) durant la saison des pluies, ils sont remplacés par les fanes d'arachide (marron) en début de saison sèche et ce, jusqu'à la saison des pluies suivante.

Annexe 7. Gestion de la biomasse pour la fertilisation azotée des parcelles

Dans la [Figure 53](#) on observe notamment que dans tous les scénarios les animaux contribuent à deux tiers de la fertilisation azotée des parcelles via les dépôts directs (excréments en bleu) ou indirects (fumier en orange).

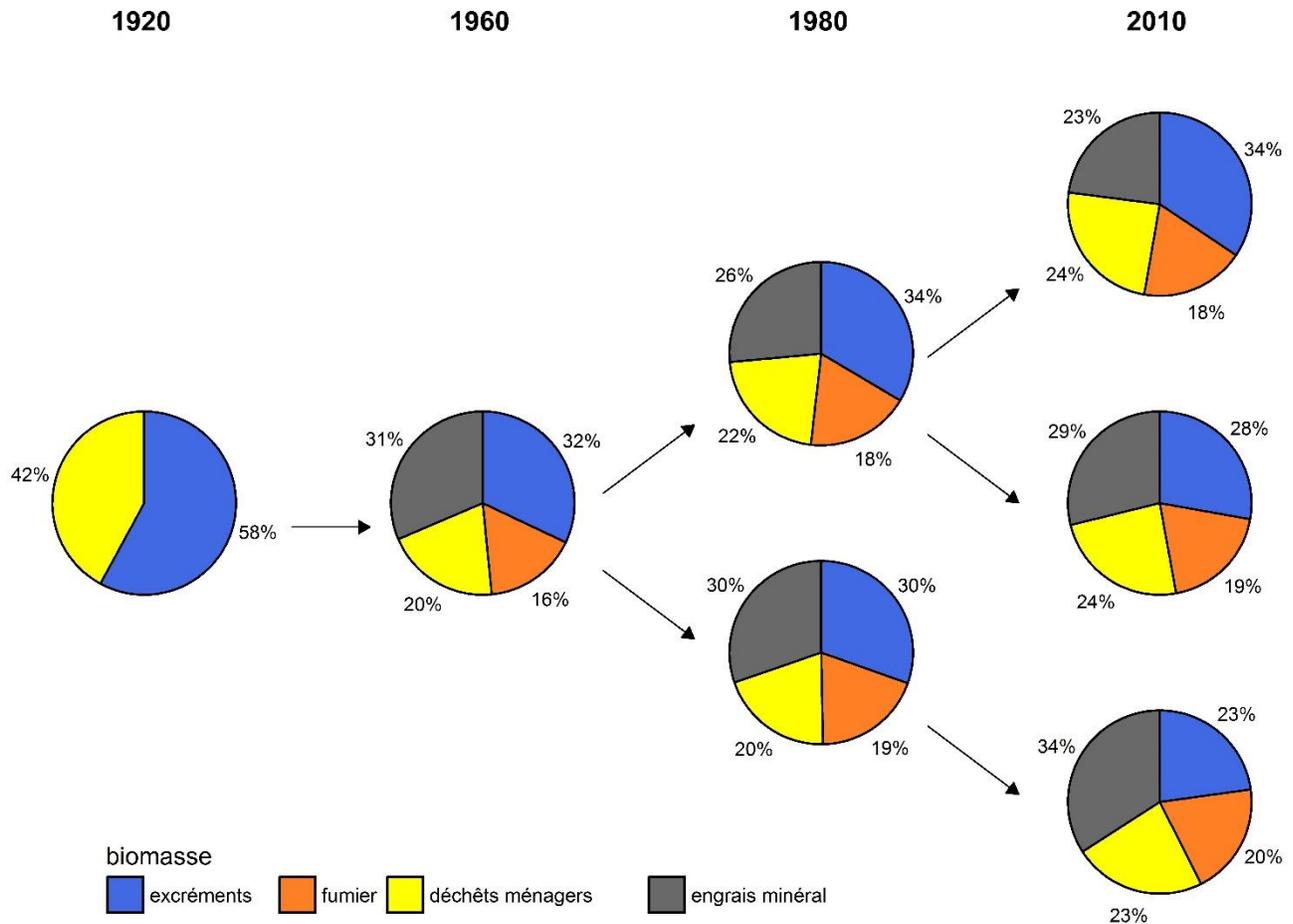


Figure 53. Part des types de biomasses dans la fertilisation azotée des parcelles dans les 3 trajectoires étudiées (traditionnelle, transhumante et embouche)

Dans les différents scénarios, la variable d'entrée évolutive concernant directement la fertilisation est celle concernant la quantité d'engrais minéral disponible. Le nombre d'animaux ainsi que l'occupation du sol évoluent également et ont un impact indirect sur la fertilisation.

Annexe 8. Photographies relatives à la gestion de l'alimentation des troupeaux dans le bassin arachidier du Sénégal

Crédit photo Myriam Grillot



Jachère au milieu des champs cultivés où paissent les bovins conduits en extensif durant la saison des pluies



Bovin en embouche



Stock de fourrages et consommation de fourrages à l'étable



Charrette de tiges de mil récoltées pour être stockées



Stock de fanes d'arachide (gauche) et séchage des fanes de niébé (droite) dans les habitations



Apport de fourrage en vert pour un étalon, localisé dans les zones d'habitat en bordure de champ de case

Annexe 9. Photographies relatives à la gestion de la matière organique dans le bassin arachidier du Sénégal

Crédit photo Myriam Grillot



Accumulation de fumier issu d'animaux à l'embouche, à l'étable



Tas de déchets en zone d'habitat



Epandage du fumier dans les champs de case, quelques mois avant le début de la saison des pluies - juin 2015



Champs de case semés en mil, avec différentes quantités de fumier pailleux épandues



Champs de case où les animaux conduits en extensif sont (gauche) et ont été (droite) parqués la nuit en saison sèche



Champs de brousse en jachère où les animaux conduits en extensif sont parqués en saison des pluies