

**BURKINA FASO**

*Unité – Progrès - Justice*

**UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE DE BOBO-DIOULASSO**

-----  
**INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL**



## **THÈSE**

de

**DOCTORAT EN DEVELOPPEMENT RURAL**

**Option** : Systèmes de Productions Végétales

**Spécialité** : Science du Sol

Présentée par :

**Aristide Wendyam SEMPORE**

**Rôle de la modélisation dans l'aide à la conception de systèmes de production innovants : le cas des exploitations de polyculture-élevage à l'Ouest du Burkina Faso.**

Soutenue le 26 Octobre 2015 devant le jury composé de :

**Président** : Pr Théodore **TAPSOBA**, Professeur titulaire, UPB, Burkina Faso

**Membres** : Pr Irénée **SOMDA**, Professeur titulaire, UPB, Burkina Faso (Rapporteur)

Dr Abdou **FALL**, Chercheur principal ILRI, Représentant régional de l'ILRI, Burkina Faso (Rapporteur)

Dr Mélanie **BLANCHARD**, Chercheur CIRAD/ CIRDES (représentante de la Co-directrice de thèse)

Pr Hassan B. **NACRO**, Professeur titulaire, UPB, Burkina Faso (Co-directeur de thèse)

Dr Michel **SEDOGO**, Directeur de recherches, INERA/CNRST, Burkina Faso (Directeur de thèse)

## RESUME

En Afrique subsaharienne, les producteurs sont confrontés de nos jours à des évolutions dues à la croissance démographique, la variation du climat et celle liée à l'environnement économique qui nécessitent un changement de stratégies de production. La recherche a proposé différents outils d'aide à la réflexion et à la discussion parmi lesquels les outils de simulation à l'échelle de l'exploitation pour aider les exploitants à concevoir des systèmes agricoles innovants. Ces modèles suivent différents courants de modélisation généralement exclusifs mais peu d'analyses ont été faites sur l'intérêt spécifique de ces modèles pour l'accompagnement des producteurs. Cette thèse a analysé les intérêts et limites de différents outils de simulation à l'échelle de l'exploitation dans l'accompagnement des producteurs à la prise de décision. Elle s'est déroulée en zone cotonnière Ouest du Burkina Faso avec 18 producteurs représentant la diversité rencontrée dans cette zone (agriculteur, agro-éleveur et éleveur). Nous avons d'abord analysé la fertilité chimique de 40 parcelles culturales des producteurs en lien avec leurs pratiques actuelles de production agricole. Ensuite elle s'est basée sur l'utilisation conjointe de trois outils représentant différemment l'exploitation agricole : « Optimcikedà », outil d'optimisation, « Cikèda », simulant de manière statique le fonctionnement de l'exploitation agricole, et « Simflex », simulant de manière pluriannuelle les règles de décisions du producteur. Cikedà a été utilisé premièrement pour aider 6 producteurs dans la co-conception de stratégies alternatives d'intégration agriculture-élevage. Ensuite, les trois outils ont été utilisés simultanément auprès des 18 producteurs afin d'analyser leur intérêt dans la planification de la prochaine campagne agricole. Cette étude nous a permis de savoir que les producteurs rencontrent des problèmes de baisse de la fertilité chimique de leurs sols liée aux pratiques actuelles de production agricole. Des stratégies d'amélioration de l'intégration entre les systèmes de culture et d'élevage ont été co-conçues par les producteurs via le modèle de simulation Cikèda mais les résultats ont montré des insuffisances dans l'amélioration réelle de la fertilité des sols. L'utilisation des trois outils a permis aux intervenants (producteurs et chercheurs) d'acquérir des connaissances supplémentaires dans la réflexion et la conception de stratégies innovantes agropastorales. Cette analyse des pratiques agropastorales via les outils de simulation permet de renouveler les méthodes existantes pour la conception de stratégies agro-pastorales innovantes en Afrique de l'Ouest.

**Mots clés :** exploitation agricole, planification, intégration agriculture – élevage, modèle de simulation, optimisation, règles de décision, Burkina Faso.

## ABSTRACT

African farmers have to implement changes in production strategies for adapting their production systems to population growth, change in climate pattern and uncertain economic environment. Research has proposed various tools in order to support them in that adaptation process, including whole-farm models for designing innovative farming systems. Three main types of whole-farms models emerge from existing literature: static simulation models, rule-based dynamic simulation models, static linear programming models. In the reviewed decision case studies, researchers focus on one model type and little analysis has been done on the specific interest of these models to the farmers' support process. This PhD study has analyzed the interests and limits of different simulation tools in supporting farmers' planning decision-making. It was conducted in the cotton zone of Western Burkina Faso. 18 farms representatives of the existing diversity of farms (crop farm, crop-livestock farm, livestock farm) were chosen in this site. First we analyzed the chemical fertility of 40 plots and the farmer's management practices of fertility. Three tools belonging to the different types of whole-farm models were used: "Cikeda" a static simulation model, "Simflex" a rule-based dynamic simulation model, and "Optimcikeda" a static linear programming model. Cikeda was first used to support 6 farmers in the co-design of alternative strategies of crop-livestock integration. Then the three tools were simultaneously used in order to analyze their added value in planning the next agricultural season. The study showed that farmers encounter chemical soil fertility problems related to current management practices. The use of Cikeda allowed farmers to improve their knowledge and perception on strategies based on improved crop-livestock integration. But the simulated effects of these strategies on soil fertility improvement were low. The use of the three whole-farm models allowed stakeholders (farmers and researchers) to acquire specific additional knowledge for planning the next cropping season. Cikeda was nevertheless the most useful tool, due to its close representation of the farm management based on calculations of balances between supply and demand of fodder, manure, or cereal at the farm level. The whole study articulating analysis of current practices and participatory exploration with farmers of scenarios at different time steps (strategic thinking and planning of the next cropping season) allows renewing existing methods for the design of innovative agropastoral strategies in West Africa.

**Keywords:** Farm, planning, crop-livestock integration, simulation model, optimization, decision rules, Burkina Faso.

## Remerciements

*Le coq qui chante si fièrement aujourd'hui  
ne doit pas oublier qu'il sort d'un œuf.*

*Inspiré par cette sagesse des moosés, je tiens à exprimer mon immense gratitude aux nombreuses personnes morales et physiques qui ont contribué dans ce cheminement, souvent tortueux mais plein d'enseignements de la thèse.*

*Un grand merci :*

*au CIRDES et au CIRAD qui ont été mes structures d'accueil depuis ma formation d'ingénieur du développement rural jusqu'à ma formation doctorale en passant par celle du DEA. J'ai bénéficié de l'expérience des chercheurs de ces centres, en particulier ceux de l'URPAN et de l'UMR Innovation ;*

*à l'IDR, pour la formation reçue à travers ses talentueux enseignants-chercheurs ;*

*au CIRAD, qui a accepté mon projet de thèse et m'a donné l'encadrement nécessaire pour ce projet. Il a aussi suivi avec intérêt toutes les activités menées au cours de ce projet.*

*Ce travail a été mené sous la codirection du Prof Michel P. SEDOGO, chercheur à l'INERA et du Prof Bismarck H. NACRO, Enseignant chercheur à l'IDR/UPB. Je tiens à leur adresser mes sincères remerciements pour leurs conseils précieux, pour la confiance et les encouragements à mon égard.*

*Mes remerciements s'adressent aux imminents professeurs que j'ai eus l'honneur d'avoir comme rapporteurs pour certains et membres du jury de thèse. Il s'agit de :*

*- Pr Théodore TAPSOBA*

*- Dr François LOMPO*

*- Pr Irénée SOMDA*

*- Dr Abdou FALL*

*- Dr Mélanie BLANCHARD*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Dr Valentine C. YAPI-GNAORE, Directrice générale du CIRDES, pour l'accueil au sein de sa structure.*

*Un immense merci au Dr Nadine Andrieu, Chercheur agronome modélisatrice au CIRAD en poste au CIAT pour avoir proposé ce projet de thèse et pour avoir été présente régulièrement tout au long de ce travail. Intellectuellement et professionnellement j'ai appris à vos côtés depuis mes premiers pas dans la recherche à travers le stage d'ingénieur agronome. Merci pour votre disponibilité, merci pour votre réactivité, merci pour votre investissement. Je vous dois ma formation de chercheur.*

*Je suis très reconnaissant envers le Dr Pierre-Yves LE GAL, Chercheur agronome au CIRAD, co-encadrant dans cette thèse pour la confiance qu'il m'a accordée, pour son appui scientifique permanent tout au long de ce travail, pour son soutien constant et une disponibilité jamais démentie. Il m'a fait bénéficier de sa grande expérience surtout en matière de rédaction d'article scientifique.*

*J'adresse toute ma reconnaissance au Dr Patrick DUGUE, Chercheur agronome au CIRAD en poste à l'ENA au Maroc, co-promoteur de cette thèse, pour m'avoir recommandé pour le financement de cette thèse au CIRAD et pour avoir ficelé la convention. Il a cru en mes capacités et sa contribution scientifique dans ce travail a été fort appréciable.*

*Je remercie Dr Augustin KANWE (Chef de l'URPAN/CIRDES), Dr Zakaria BENGALY (Directeur scientifique du CIRDES), Dr Eric VALL (chercheur au CIRAD), Dr Mamadou SANGARE (chercheur au*

CIRDES), Dr Eduardo CHIA (chercheur au CIRAD), Dr Augustin BANCE (Responsable de la cellule formation au CIRDES), pour leur précieuse contribution.

Je remercie Dr Frédérique ANGEVIN et Dr Damien CRAHEIX, chercheurs à l'INRA Grignon, qui m'ont initié à l'analyse multicritère avec le logiciel Dexi.

Je tiens également à remercier les autres membres de mon comité de thèse pour leurs conseils avisés sur l'avancement de la thèse : Dr François LOMPO (Actuel Ministre de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques, de l'Assainissement et de la Sécurité Alimentaire), Dr Bernard BACYE (Enseignant-chercheur à l'IDR/UPB), Dr Sansan YOUL (chercheur à l'IFDC), Dr Zacharia GNANKAMBARY (DG du BUNASOL), Dr Emmanuel COMPAORE (chercheur à l'INERA).

Je remercie l'ensemble des producteurs des villages de Koumbia, de Waly et de Sébédougou pour leur accueil et leur disponibilité. C'est l'occasion pour moi de dire merci à M. Blaise KERE (commerçant à Koumbia) ainsi qu'à ces femmes pour les différents repas partagés ensemble au bord de la route.

J'adresse mes remerciements à M. Innocent BAYALA technicien au CIRDES pour son aide constante et échanges constructifs durant cette étude.

Je suis reconnaissant à l'ensemble du personnel de la Direction Administrative et Financière du CIRDES en particulier, M. Abdel Rachid OROU-GUIDOU (DAF du CIRDES) pour la sympathie et les encouragements à mon égard.

Un grand merci à M. Der DABIRE, ainsi qu'aux collègues stagiaires (anciens) du CIRDES tous pensionnaires de « Guantanamo » que je nomme : M. Massouroudini AKOUDJIN, Dr Jacques KABORE, Dr Hamidou ILBOUDO, Dr Emilie DAMA, Dr Ernest SALOU, Dr Bienvenu Martin SOMDA, M. Tidiane DIARISO (à cheval entre ACT et le CIRDES), M. Modou SERE stagiaire, Mlle Oumou CAMARA (à cheval entre la Guinée et le CIRDES). Les attaques ciblées vont laisser place maintenant aux bons partenariats gagnant-gagnant. Nous avons passé d'agréable moment ensemble.

Je suis très reconnaissant à mes parents (papa Jean Pierre et maman Rosalie) pour les efforts consentis à mon éducation et pour le soutien constant durant toutes ces années d'études. Je leur **dédie** cette thèse. Ma reconnaissance va également à l'endroit de tous mes frères (Constant et Arnaud) ainsi que leurs épouses (Emmanuelle et Martine) et enfants pour les encouragements et le soutien. Je dis merci à ma petite sœur (Irène) et son Mari (Antoine) ainsi que leurs enfants pour l'accueil et le soutien lors de mes séjours en France. J'adresse également toute ma gratitude aux familles BERE et BAGUIA à Bobo-Dioulasso pour leur hospitalité et leur soutien constant.

J'adresse ma reconnaissance à ma bien-aimée Emiline, qui m'a apporté beaucoup de réconfort dans cette expérience doctorale. Je remercie également mes amis : Emmanuel KOAMA, Dr Mathias POUYA, Paul OUEDRAOGO, Didier SAWADOGO, Serge BASSEPE, Dr Salif DERRA, Philippe SEOGO, Dominique OUEDRAOGO, Romaric OUEDRAOGO... Vos encouragements et prières m'ont permis d'aller de l'avant dans cette aventure.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à cette aventure doctorale et dont leurs noms n'ont pu être cités.

A tous je vous dis immensément merci et que Dieu vous bénisse.

## Avant-propos

### **Financement**

Cette thèse a été cofinancée par le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement), le projet CORUS 6057 et le Centre National de l'Information, de l'Orientation Scolaire et Professionnelle, et des Bourses (CIOSPB) du Ministère des Enseignements Secondaire et Supérieur (MESS).

### **Centres d'accueils**

Les Centres d'accueils de cette thèse sont l'Unité de Recherche sur les Productions Animales (URPAN) du Centre International de Recherche-Développement sur l'Elevage en zone Subhumide (CIRDES) à Bobo-Dioulasso (Burkina-Faso), l'Unité Mixte de Recherche Innovation (Innovation et Développement dans l'Agriculture et l'Agroalimentaire) du Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) à Montpellier (France) et le Laboratoire d'Etude et de Recherche sur la Fertilité du sol (LERF) de l'Institut du Développement Rural /Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (IDR/UPB).

# TABLE DE MATIERES

	Pages
RESUME.....	i
ABSTRACT .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
AVANT-PROPOS .....	v
TABLE DE MATIERES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES ABREVIATIONS .....	xii
Chapitre 1 : Introduction générale.....	1
1.1. Pratiques agropastorales en mutation en Afrique Subsaharienne .....	1
1.2. Modèles : Outils potentiels pour l’accompagnement des mutations dans les exploitations agricoles.....	3
1.2.1. Modèles de simulation à l’échelle de l’exploitation agricole sans modélisation des règles de décision du producteur.....	4
1.2.2. Modèle de simulation des règles de décision du producteur.....	6
1.2.3. Modèles d’optimisation du revenu du producteur.....	7
1.3. Question de recherche .....	8
1.5. Plan de la thèse.....	11
Chapitre 2 : Cadre de l’étude et démarche générale.....	12
2.1. Cadre de l’étude .....	12
2.1.1. Zone d’étude.....	12
2.1.2. Climat.....	13
2.1.3. Sols.....	13
2.1.4. Végétation .....	14
2.1.5. Population.....	14
2.1.6. Production agropastorale.....	15
2.2. Démarche générale.....	16
2.2.1. Outils de simulation utilisés .....	16
2.2.2. Choix des producteurs .....	26
2.2.3. Démarche d’utilisation des modèles .....	27

Chapitre 3 : Pratiques actuelles et fertilité chimique des sols dans les exploitations de Koumbia et Waly .....	30
3.1. Méthodologie .....	30
3.1.1. Choix des parcelles d'étude.....	30
3.1.2. Paramètres mesurés .....	31
3.1.3. Analyses chimiques des sols .....	31
3.1.4. Analyses de données et présentation des résultats .....	32
3.2. Résultats .....	33
3.2.1. Effet des pratiques de fertilisation sur les propriétés chimiques du sol .....	33
3.2.2. Effet du type de producteur sur les propriétés chimiques du sol .....	35
3.3. Discussion .....	39
3.3.1. Pratiques de fertilisation et propriétés chimiques du sol.....	39
3.3.2. Types de producteurs et propriétés chimiques du sol .....	39
3.4. Conclusion partielle.....	40
Chapitre 4 : Quelles stratégies pour améliorer l'intégration agriculture-élevage dans des exploitations de polyculture ouest-africaine ? Approches par simulation avec les producteurs .....	42
4.1. Méthodologie .....	42
4.1.1. Choix des producteurs et informations collectées.....	42
4.1.2. Démarche d'interactions avec les producteurs.....	43
4.1.3. Analyses des données et présentation des résultats.....	44
4.2. Résultats .....	46
4.2.1. Etat initial des connaissances et pratiques d'intégration agriculture-élevage .....	46
4.2.2. Simulation et évaluation ex-ante de scénarios prospectifs.....	49
4.3. Discussion .....	59
4.4. Conclusion partielle.....	60
Chapitre 5 : Evaluation de trois applications en situation d'aide à la planification des producteurs .....	62
5.1. Méthodologie .....	62
5.1.1. Exploitations et modèles utilisés .....	62
5.1.2. Démarche utilisée .....	62
5.1.3. Analyse des données et présentation des résultats .....	65
5.2. Résultats .....	66
5.2.1. Scénario fonction des types d'exploitation .....	66



5.2.2. Evaluation des outils par les producteurs .....	67
5.2.3. Facilitation des apprentissages des producteurs .....	70
5.2.4. Facilitation des apprentissages du chercheur .....	74
5.2.5. Evaluation multicritère des trois outils.....	75
5.3. Discussion .....	77
5.3.1. Modèles à l'échelle de l'exploitation pour quoi faire ?.....	77
5.3.2. Quelle adéquation entre la conception des outils et la réalité des producteurs ? ...	78
5.4. Conclusion partielle.....	79
Chapitre 6 : Discussion générale .....	81
6.1. Quelles réflexions pour améliorer la production agropastorale ?.....	81
6.2. Les modèles numérisés permettent-ils d'aider les producteurs dans leurs réflexions et selon quelles modalités ?.....	82
6.3. Quels intérêts et limites méthodologiques peut-on tirer de cette étude ?.....	84
6.4. Quelles perspectives pour un meilleur accompagnement des producteurs intégrant les modèles ?.....	85
Conclusion générale .....	87
Références bibliographiques .....	91
Annexes .....	I

## LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau I : Règles de décisions simulées (Andrieu et Chia, 2012).....	23
Tableau II : Caractéristiques structurelles des exploitations.....	27
Tableau III : Nombre d’exploitations par modèle.....	28
Tableau IV : Nombre de parcelles/ type de producteur/ pratiques de fertilisation (année 2011) .....	31
Tableau V: Pratiques de fertilisation et propriétés chimiques des sols.....	33
Tableau VI: pH <sub>eau</sub> et teneurs en matières organiques (M.O) et azote total (N) des sols des 3 types de producteurs.....	37
Tableau VII : Aspects des connaissances et pratiques des producteurs relevés par entretien .	43
Tableau VIII : Caractéristiques structurelles et fonctionnelles des six exploitations.....	43
Tableau IX : Caractéristiques du scénario S <sub>0</sub> pour les six exploitations.....	50
Tableau X: Variation des valeurs des entrées entre S <sub>0</sub> et S <sub>1</sub> pour les 6 exploitations.....	54
Tableau X : Différentes stratégies d’intégration agriculture – élevage envisagées par les exploitants.....	57
Tableau XI : Scénario et pratiques réelles des producteurs.....	58
Tableau XIII: Nature des données complémentaires collectées pour chaque outil de simulation .....	64
Tableau XIV: Grille d’évaluation appliquée à chaque producteur et outil de simulation.....	65
Tableau XV: Préoccupations des producteurs et thèmes proposés par les producteurs.....	67
Tableau XVI: Nombre de producteurs déclarant avoir accru leurs connaissances par thème en lien avec l’utilisation d’un des trois outils.....	71
Tableau XVII : Nombre de producteurs ayant modifié leurs pratiques en lien avec l’utilisation d’un des trois outils.....	73

## LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1 : Carte de la zone d'étude (Koumbia Waly) .....	12
Figure 2 : Hauteur d'eau et nombre de jours de pluie entre 2003 et 2012 dans la station pluviométrique de Koumbia (source UDPC) .....	13
Figure 3 : Evolution de la population de la province du Tuy de 1985 à 2020 (INSD, 2009) ..	15
Figure 4 : Modèle conceptuel Cikèda représentant les différents flux entre les entrées et sorties des sept modules (Andrieu <i>et al.</i> , 2012).....	18
Figure 5 : Interfaces des entrées et sorties du modèle Cikèda.....	20
Figure 6 : Modèle conceptuel Simflex représentant les différents flux entre les entrées et sorties des sept modules (Andrieu et Chia, 2012) .....	21
Figure 7 : Interfaces des entrées et sorties du modèle Simflex .....	22
Figure 8 : Modèle conceptuel Optimcikèda représentant les différents flux entre les entrées et sorties des sept modules (Adapté de Zongo (2010)) .....	24
Figure 9 : Interfaces des entrées et sorties du modèle Optimcikèda .....	26
Figure 10 : pH <sub>eau</sub> des sols en fonction des pratiques (avec apport de fumure organique et minérale ; avec apport seul de fumure minérale ; sans apport de fumure) de fertilisation .....	33
Figure 11 : Teneurs en matière organique (M.O) en fonction des pratiques (avec apport de fumure organique et minérale ; avec apport seul de fumure minérale ; sans apport de fumure) de fertilisation.....	34
Figure 12 : Rapport C/N en fonction des pratiques (avec apport de fumure organique et minérale ; avec apport seul de fumure minérale ; sans apport de fumure) de fertilisation .....	35
Figure 13 : pH <sub>eau</sub> des sols des 3 types de producteurs en fonction des pratiques d'apport et sans apport de fumure organique .....	36
Figure 14 : Teneur en Matière organique (M.O) des sols des 3 types de producteurs en fonction des pratiques d'apport et sans apport de fumure organique.....	37
Figure 15 : Rapport C/N des sols des 3 types de producteurs en fonction des pratiques d'apport et sans apport de fumure organique .....	38
Figure 16 : Quantités de fourrage et de fumure organique stockées par types de producteurs et nombre de producteurs par type résidus stockés et par type de fumure organique produite au sein des exploitations .....	48
Figure 17 : Connaissances des producteurs sur les liens entre l'augmentation de la quantité de fumure organique produite, l'augmentation de la production végétale au sein de l'exploitation,	

l'augmentation de la quantité de fourrage pour les animaux et l'augmentation de la production animale de l'exploitation.....	49
Figure 18 : Quantité de la fumure organique épandue sur le maïs et pourcentage de la fumure organique épandue sur toute la superficie cultivée par type de producteur avec les scénarios S <sub>0</sub> / S <sub>1</sub> .....	51
Figure 19 : Bilan fourrager en termes de kg de Matière Azotée Digestible (MAD) par type de producteur en fonction de l'année climatique (favorable, moyenne, défavorable) avec les scénarios S <sub>0</sub> /S <sub>1</sub> .....	52
Figure 20 : Bilan céréalier en termes de production de maïs et de sorgho grain (kg) par type de producteur en fonction de l'année climatique (favorable, moyenne, défavorable) avec les scénarios S <sub>0</sub> /S <sub>1</sub> .....	55
Figure 21 : Revenu moyen (en F CFA) par actif de chaque type de producteur en fonction de l'année climatique (favorable, moyenne, défavorable) avec les scénarios S <sub>0</sub> /S <sub>1</sub> .....	56
Figure 22 : Etapes de la démarche suivie pour l'évaluation des trois modèles.....	63
Figure 23 : Nombre de producteur par thème ayant validé le réalisme des sorties du modèle et/ou trouvé pertinent les thèmes traités en fonction de chaque modèle .....	70
Figure 24 : Pourcentage de variation des stocks de fourrage et de fumure organique par type de producteur en fonction du modèle entre la situation initiale et finale de chaque exploitation .....	72
Figure 25 : Schéma d'évaluation de chaque modèle en fonction des trois critères (validation par les producteurs, facilitation d'apprentissage pour le producteur et facilitation d'apprentissage pour l'intervenant) utilités.....	77

## LISTE DES ABREVIATIONS

**A** : Agriculteur

**AE** : Agro-éleveur

**APSIM** : Agricultural Production Systems Simulator

**B emb** : bovin d'embouche

**BE** : Bovin d'élevage

**BT** : Bovin de trait

**CIRAD** : Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement

**CIRDES** : Centre International de Recherche-Développement sur l'Élevage en zone Subhumide

**CP-BKF3** : Cultures pluviales du Burkina Faso version 3

**DSSAT**: Decision Support System for Agrotechnology

**E** : Eleveur

**FAO**: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

**FO**: Fumure organique

**ICRISAT**: International Crop Research Institute for the Semi-Arid Tropics

**IDR** : Institut du Développement Rural

**INERA** : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

**INRA**: Institut National de la Recherche Agronomique

**INSD**: Institut National de la Statistique et de la Démographie

**LERF** : Laboratoire d'Etude et de Recherche sur la Fertilité du Sol

**M.O**: Matière organique

**MAD** : Matière azotée digestive

**PLBM**: Programmation Linéaire à Buts Multiples

**QUEFTS**: Quantative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils

**S**: scénario

**SP** : Saison pluvieuse

**SSC** : Saison sèche chaude

**SSF** : Saison sèche froide

**STC** : Superficie totale cultivée

**TIC** : Technologie de l'Information et de la Communication

**UBT**: Unités de Bétail Tropical

**UDPC**: Union Départementale des Producteurs de Coton

**UF:** Unités fourragères

**UPB :** Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso

**URPAN :** Unité de Recherche sur les Productions Animales

# Chapitre 1 : Introduction générale

## 1.1. Pratiques agropastorales en mutation en Afrique Subsaharienne

Dans les pays d'Afrique subsaharienne, la croissance de la demande en produits agricoles a été supérieure à l'offre réelle de production ces quatre dernières décennies (FAO, 2013). FAO (2013) prévoit un accroissement de cette demande de l'ordre de 14% à l'horizon 2030 dû à l'augmentation de la population. En effet, Collier et Dercon (2008) ont souligné combien la mauvaise performance du secteur agricole est un problème structurel de long terme en Afrique subsaharienne et à quel point l'agriculture africaine devra changer pour accompagner un développement économique en Afrique dans les 50 prochaines années. On note par ailleurs dans quelques pays d'Afrique subsaharienne que la densité de population est encore inférieure à celle de l'Asie mais la vitesse de croissance de la population de l'ordre de 2,4% est bien plus grande en Afrique subsaharienne que dans n'importe quelle autre région du monde (FAO, 2013).

Cette forte croissance de la population a entraîné une modification des pratiques agricoles en Afrique Subsaharienne jadis marquées par la pratique de la jachère et l'élevage transhumant. En effet, on assiste de nos jours à une extension des terres cultivables, une diminution de la jachère suivie de la culture permanente des terres, une sédentarisation de certains pasteurs et de fortes pressions sur les ressources naturelles (Timah *et al.*, 2008, Gaiser *et al.*, 2011). On note ainsi d'une manière générale dans les exploitations de polyculture-élevage une prédominance de deux systèmes de production. Il s'agit du système de production végétale et du système d'élevage (Herrero *et al.*, 2010). Dans les exploitations, 10% ou plus de la matière sèche donnée au bétail provient des sous-produits des cultures (Sere et Steinfeld, 1996). Ces exploitations recouvrent des situations variées, depuis des cultivateurs ayant introduit l'élevage comme source d'énergie animale (Gautier *et al.*, 2005), jusqu'à des pasteurs sédentarisés ayant développé les cultures pour couvrir leurs besoins alimentaires (Vall *et al.*, 2003, Schlecht et Buerkert, 2004).

Dans tous les cas, la combinaison des productions végétales et animales permet une diversification des revenus de l'exploitation. Mais de nombreux travaux montrent que le niveau d'intégration entre agriculture et élevage est perfectible dans les exploitations agricoles d'Afrique sub-saharienne (Herrero *et al.*, 2010 ; Pretty *et al.*, 2011). En effet, le faible niveau d'intégration entre l'agriculture et l'élevage en milieu rural se traduit par une faible valorisation de la fumure organique pour la production végétale et une faible production de

fouillage pour les animaux. Selon Gerner et Harris (1993), l'utilisation de l'engrais organique et minéral comme source externe de nutriments ne couvre qu'entre 11 et 22% des surfaces des cultures céréalières. Il en résulte une baisse de la fertilité des sols (Sédogo, 2008) avec pour conséquence la baisse de la production agropastorale (Bationo *et al.*, 2007). De ce fait, l'enjeu pour les producteurs est de concevoir des stratégies innovantes pour augmenter la production agro-pastorale tout en gérant durablement les ressources naturelles via en particulier une meilleure intégration entre systèmes de culture et d'élevage (Harris, 2002 ; Zingore *et al.*, 2007 ; Reij et Smaling, 2008).

Ces stratégies innovantes doivent aussi tenir compte des aléas climatiques liés essentiellement à la mauvaise répartition des pluies dans l'espace et dans le temps (Cooper *et al.*, 2008). En effet, les aléas climatiques constituent un facteur important de la trop grande variation des productions agricoles (Some, 1989 ; Ingram *et al.*, 2002 ; Morton, 2007 ; Schlenker et Lobell, 2010). Ces exploitations d'Afrique sub-saharienne sont également confrontées à des aléas économiques (Bazzaz et Sombroek, 1996 ; Kokou, 2007) du fait de l'absence de systèmes de garanties, de la faible structuration des filières, de l'étroitesse des marchés, des coûts élevés des transactions entre pays, et du mauvais état des infrastructures de transport (Bryceson, 2000 ; Kelly *et al.*, 2003 ; Delpeuch et Vandeplas, 2013).

Pour faire face à ces évolutions, les producteurs sont contraints de changer ou d'adapter leurs stratégies et pratiques actuelles de production agricole.

C'est dans ce contexte que différentes propositions techniques ont été élaborées par la recherche en vue d'améliorer durablement les stratégies de production agropastorales. On peut citer entre autre les jachères améliorées (Segda *et al.*, 1996), l'utilisation intégrée des engrais organiques et minéraux (Bado *et al.*, 1997 ; Lompo *et al.*, 2007), ou l'enfouissement des résidus (Koulibaly *et al.*, 2010) pour améliorer la fertilité des sols. On peut également citer l'introduction de légumineuse fourragère ou de culture fourragère (César *et al.*, 2004) dans l'assolement vivrier, les jachères fourragères, les prairies permanentes, les haies-vives fourragères herbacées ou ligneuses (César et Koulibaly, 1990 ; César *et al.*, 2004), les systèmes de rationnement à partir des résidus de culture (Savadogo, 2000), les traitements chimiques de la paille (Nianogo *et al.*, 1995 ; Bougouma-Yaméogo, 1997) pour accroître les disponibilités en produits fourragers pour les besoins du troupeau.

Ces propositions sont en général conçues et diffusées à partir d'une vision partielle (cultures de rente ou céréalière, amélioration de la fertilité chimique, amélioration de la qualité alimentaire des fourrages pour les animaux...) des exploitations agricoles. Egalement ces



propositions non adoptées à grande échelle (Pouya *et al.*, 2013) supposent des changements dans le fonctionnement des exploitations agricoles qui ne sont pas le plus souvent pris en compte par les vulgarisateurs et/ou les conseillers agricoles. Ainsi, les producteurs doivent disposer d'informations leur permettant d'analyser dans un temps relativement court, les effets possibles de l'introduction de ces propositions sur leurs exploitations agricoles. La modélisation représente alors un moyen de leur fournir ces informations avant l'introduction de ces innovations dans leurs exploitations agropastorales.

## **1.2. Modèles : Outils potentiels pour l'accompagnement des mutations dans les exploitations agricoles**

La modélisation peut être définie comme un moyen de formalisation conceptuelle d'un système, exprimée sous forme d'une ou de plusieurs hypothèses (Van Ittersum et Donatelli, 2003). Elle est un outil de recherche selon Daalen et Shugart (1989), qui permet de synthétiser l'information connue et d'en identifier les manques.

Le modèle peut donc être considéré comme une représentation simplifiée d'un système réel. Coquillard et Hill (1997) et Davi *et al.* (2003) définissent le modèle comme une abstraction qui simplifie la réalité en ignorant certaines caractéristiques du système réel étudié, pour se concentrer sur les aspects qui intéressent le modélisateur et qui définissent la problématique du chercheur. Les modèles peuvent permettre d'identifier les insuffisances des connaissances scientifiques, les fausses hypothèses et de fournir de nouveaux aperçus. Ils peuvent permettre aussi d'explorer, de générer et tester des hypothèses et aider à la conception d'expérimentations (Sinclair et Seligman, 1996 ; Ezui, 2001). C'est ainsi que les méthodes d'expérimentation de plein champ, qui pouvaient se prolonger sur plusieurs années, utilisent progressivement et de façon complémentaire les modèles de simulation informatiques, plus rapides pour le test et la validation des hypothèses avancées par les agronomes (Keating et McCown, 2001 ; Van Ittersum et Donatelli, 2003 ; Rellier, 2005). Ainsi, la modélisation et la simulation informatique sont un véritable banc d'essai des théories, qui affranchit le chercheur, d'une part, de la temporalité expérimentale, souvent trop longue et d'autre part, de l'irréversibilité de l'expérimentation. Les modèles sont utilisés dans la recherche fondamentale où ils aident à faire des prévisions de rendements, des analyses de risques (par exemple effets des dates de semis), à mettre au point des priorités pour la recherche afin de réduire les coûts liés à l'expérimentation.

Les outils de simulation sont un moyen d'explicitier le fonctionnement des systèmes de production agricoles et aider à mieux comprendre les conditions de leur viabilité, ou de trouver des manières innovantes de les conduire sous l'effet de conditions économiques, sociales ou réglementaires nouvelles (Attonaty *et al.*, 1999).

Ces outils peuvent éventuellement contribuer à aider le producteur dans sa prise de décision (Keating et McCown, 2001 ; Van Ittersum et Donatelli, 2003). Ils ont alors pour objectif général d'assister leurs utilisateurs finaux (agriculteurs, conseillers agricoles, gestionnaires des territoires...) dans leurs choix. A partir de fonctions prédictives, ils permettent de représenter les évolutions d'un certain nombre d'indicateurs, conséquences des décisions prises et des pratiques mises en œuvre sur les composantes étudiées du système (Keating et McCown, 2001). Ils peuvent permettre ainsi la simulation de l'impact de futurs scénarios de gestion avant leur mise en application, fournissant aussi des tendances pour des discussions entre utilisateurs et exploitants agricoles.

Les démarches de modélisation à l'échelle de l'exploitation s'avèrent très utiles pour aborder la question des transformations à mettre en place dans les exploitations agricoles (Attonaty et Soler, 1991 ; Davi *et al.*, 2003). En effet, les modèles informatiques sont des outils pertinents d'analyse ex-ante de différents scénarios (Sinclair et Seligman, 1996 ; Ezui, 2001 ; Van Ittersum et Donatelli, 2003). Les modèles à l'échelle de l'exploitation agricole permettent également de rendre compte des articulations (compétition, intégration) entre les systèmes de cultures et d'élevage de l'exploitation, les interactions entre le système biophysique (qui comprend les interactions entre les composantes physiques et biologiques du système), le système technique (qui est la combinaison des techniques mises en œuvre par le producteur sur le système biophysique) et le système décisionnel (système de gestion de l'exploitation, représentant la composante humaine du système). On peut classer ces modèles informatiques à l'échelle de l'exploitation en différents types selon qu'il s'agit de la simulation statique et sans modélisation des règles de décision du producteur, de la simulation à base de règle ou d'optimisation (Penning de Vries et Rabbinge, 1995 ; Janssen et van Ittersum, 2007).

### ***1.2.1. Modèles de simulation à l'échelle de l'exploitation agricole sans modélisation des règles de décision du producteur***

La modélisation par simulation utilise une représentation schématique du système dont elle reproduit le comportement. Elle consiste à représenter un système par un jeu d'équations plus

ou moins complexes pour décrire son fonctionnement, en prenant en compte ses interactions avec l'environnement (Cros *et al.*, 2006 ; Martin *et al.*, 2012). Elle permet donc d'explorer rapidement et à moindre coût, les performances d'une diversité de systèmes agricoles, pour une diversité de contextes de production et d'identifier leurs propriétés émergentes.

Plusieurs auteurs ont développé des modèles de simulation statique et dynamique sans modélisation des règles de décision du producteur pour aider le chercheur à décrire et comprendre les processus biophysiques des producteurs (Le Gal *et al.*, 2011). Ainsi, Buysse *et al.* (2005) ont développé un modèle de simulation pour évaluer l'influence de trois systèmes de production végétale sur la nutrition des vaches laitières au niveau des exploitations agricoles. Ces modèles d'évaluation d'impact économique agricole (Gibbons *et al.*, 2005), de simulation de systèmes agro-écologiques (Snow et Lovatt, 2008), développés pour la plupart dans les pays occidentaux ont pu apporter des réponses face aux attentes de leurs concepteurs. En Afrique, les modèles de simulation sont habituellement des modèles génériques déjà expérimentés ailleurs et adaptés selon nos contextes. Nous avons le cas du modèle NUANCES-FARMSIM (Nutrient Use in ANimal and Cropping systems: Efficiencies and Scales - FARM SIMulator) développé par van Wijk *et al.* (2009) et utilisé dans les petites exploitations de l'Ouest du Kenya. C'est un modèle de simulation dynamique pour l'exploration de systèmes de gestion stratégique de l'exploitation agricole à court et long termes. Ces modèles de simulation sont des supports de raisonnement nécessaires face à la complexité des facteurs à prendre en compte, mais sont en général non transférables à d'autres utilisateurs qu'à leur concepteur (Le Gal *et al.*, 2011).

Selon Matthews *et al.* (2000), beaucoup de modèles de simulation utilisés dans la recherche sont souvent aptes à faciliter la prise de décision chez les producteurs. Ils peuvent également aider au processus de réflexion du producteur à des décisions complexes en fournissant différentes informations autour de sa préoccupation. Dans la littérature, on trouve des travaux qui portent sur l'utilisation des modèles de simulation en situation d'aide à la réflexion du producteur dans un processus de modification de son système vers de nouvelles alternatives de production agricole. Ainsi, Lisson *et al.* (2010) ont développé et testé avec les producteurs, un modèle de simulation pour évaluer et favoriser l'adoption de nouvelles technologies d'amélioration du fourrage visant à accroître l'offre en bétail dans les exploitations agricoles d'Indonésie. Les travaux de Sørensen *et al.* (2005), de Sempore *et al.* (2011), de Andrieu *et al.* (2012) et de Le Gal *et al.* (2013) montrent différents modèles qui sont utilisés pour aider le producteur à la réflexion autour de ses activités agricoles. En effet, Sørensen *et al.* (2005) ont

conçu avec des conseillers agricoles et simulé avec un modèle, plusieurs scénarios possibles de l'agriculture biologique basée sur la production céréalière, de lait et de viande. Ils ont évalué par la suite, l'impact de l'introduction de ces nouvelles technologies sur les performances des exploitations agricoles. Sempore *et al.* (2011) ont utilisé un modèle de simulation à l'échelle de l'exploitation pour coconcevoir avec les producteurs des scénarios d'introduction d'embouche bovine dans les exploitations de l'ouest du Burkina Faso. Ce modèle développé par Andrieu *et al.* (2012), en vue d'améliorer les performances de production des exploitations mixtes, permet d'analyser ex-ante différents scénarios d'évolution de ces exploitations. Dans les travaux de Le Gal *et al.* (2013), un modèle de simulation a été utilisé individuellement avec les producteurs comme un support de discussion et de réflexion autour des stratégies de production de lait dans les exploitations agricoles.

### ***1.2.2. Modèle de simulation des règles de décision du producteur***

Les modèles à base de règles de décision représentent les décisions des producteurs par un corps de règles, qui se caractérise par une action à effectuer sur une entité du système de production (Cros *et al.*, 2001 ; Vayssières *et al.*, 2007). Ce sont généralement des modèles qui visent à donner une représentation générique de la façon dont les agriculteurs planifient leurs activités agricoles (Le Gal *et al.*, 2011). Ils incluent un ensemble de règles « SI Conditions ALORS Action » qui définissent la nature de la décision à prendre lorsque certaines conditions sont rencontrées (Andrieu et Nogueira, 2010 ; Bergez *et al.*, 2012). Ces modèles associent généralement un module de décision avec des modèles biotechniques pour évaluer les conséquences d'une stratégie de gestion, définie comme un ensemble de décisions sur la productivité des cultures et de l'élevage (Le Gal *et al.*, 2011).

Dans cette famille de modèles à base de règles de décision, on retrouve ceux ayant des objectifs de compréhension et d'analyse des systèmes de production agricole. Ainsi, Andrieu *et al.* (2007) ont utilisé un modèle pour simuler et évaluer différentes stratégies de gestion du système fourrager et de prise en compte de la diversité de prairies dans les exploitations laitières d'Auvergne en France. Egalement, Romera *et al.* (2004) et Romera *et al.* (2010) ont utilisé des modèles de simulation pour étudier la dynamique à long terme des systèmes de production des animaux en Argentine ou pour analyser les règles de décision de production fourragère en Nouvelle-Zélande. En système de production mixte au niveau de l'île de la Réunion, Hélias *et al.* (2008) ont élaboré un modèle qui permet de gérer les déchets animaux

au sein des exploitations agricoles et de simuler leur épandage sur les unités de production végétale.

On retrouve dans cette même famille, d'autres modèles utilisés pour l'aide à la réflexion et/ou à la décision des producteurs. Par exemple, Cros *et al.* (2004) ont élaboré un modèle d'aide à la prise de décision chez les producteurs permettant d'expérimenter virtuellement différentes stratégies de gestion agricole en lien avec les conditions météorologiques. Egalement, Vayssières *et al.* (2009) ont développé un modèle à l'échelle de l'exploitation bovine laitière pour représenter l'effet des décisions des producteurs concernant la gestion des flux de biomasse sur la durabilité du système de production. Ils l'ont utilisé avec les producteurs pour évaluer ex-ante les différences en termes de durabilité de l'exploitation à travers différents degrés d'intégration agriculture-élevage (Vayssières *et al.*, 2011). Dans l'ouest du Burkina Faso, Andrieu et Chia (2012) ont élaboré un modèle nommé « Simflex » permettant d'analyser l'impact des propositions de la recherche sur la flexibilité des exploitations face aux aléas de l'environnement de production.

### ***1.2.3. Modèles d'optimisation du revenu du producteur***

Les modèles d'optimisation permettent de définir une configuration optimale des variables du système, sous un certain nombre de contraintes et en maximisant une fonction objectif (Janssen et van Ittersum, 2007). La principale technique utilisée est la programmation linéaire qui représente l'exploitation comme une combinaison linéaire d'activités. Les entrées étant en ressources limitées, les activités sont affectées de contraintes, qui représentent la quantité minimale ou maximale qui peut être utilisée. Ce système d'activités et de contraintes est alors optimisé pour une fonction « objectif », qui reflète un objectif spécifique (la maximisation du revenu par exemple) par l'utilisateur. Les modèles à l'échelle de l'exploitation utilisant l'optimisation, cherchent généralement à maximiser le revenu du producteur (Berentsen et Giesen, 1995 ; Bernet *et al.*, 2001).

En Afrique de l'Ouest, des modèles d'optimisation ont été élaborés dans le but par exemple d'analyser l'impact de l'introduction du coton Bt sur le revenu des exploitants agricoles (Cabanilla *et al.*, 2004), ou la durabilité agricole d'un village dans la zone cotonnière (Barbier, 1998), ou la viabilité à moyen et long termes du système agraire villageois (Barbier et Cattin, 1997). Barbier *et al.* (2004) ont utilisé la programmation linéaire pour prédire l'impact de la croissance démographique sur l'agriculture dans deux pays sahéliens (Burkina

Faso et Sénégal). Au Sud du Nigéria, Agbonlahor *et al.* (2003) ont évalué grâce à un modèle de programmation linéaire, la viabilité économique et la durabilité de l'adoption d'un système de production vivrière intégrée à la volaille dans les exploitations agricoles. Egalement, Zingore *et al.* (2009) ont combiné plusieurs modèles pour analyser les stratégies d'optimisation de revenus au sein des exploitations agricoles du Zimbabwe en fonction de l'utilisation des terres et de la répartition du travail.

La plupart des modèles d'optimisation semblent bien adaptés à des objectifs de recherche. Ils permettent aux chercheurs de mieux orienter leurs priorités basées sur une représentation bio-économique du fonctionnement des exploitations agricoles (Le Gal *et al.*, 2011). On retrouve très peu d'études sur l'utilisation de ces modèles dans l'aide à la réflexion et/ou à la décision des producteurs. Néanmoins, dans les travaux de van de Ven et van Keulen (2007), un modèle d'optimisation de la production laitière à l'échelle de l'exploitation a été développé pour évaluer le type de systèmes de production qui répond aux objectifs de la politique environnementale et de dégager les perspectives de la production laitière dans les sols sableux des Pays-Bas. On note également le même type de modélisation dans les travaux de Cabrera *et al.* (2005). Un exemple d'utilisation participative de la modélisation a été illustré dans les travaux de Waithaka *et al.* (2006) et Dogliotti *et al.* (2014). En effet, Dogliotti *et al.* (2014) ont fait participer les producteurs et conseillers agricoles dans un processus de co-conception d'innovations via un modèle d'optimisation de différentes stratégies de production agricole. Ces auteurs ont montré à la fin de leur expérimentation que la co-conception d'innovation via le modèle d'optimisation a permis aux producteurs d'augmenter concrètement leur revenu agricole de 51% et d'améliorer les teneurs de leurs sols en carbone organique.

### **1.3. Question de recherche**

Les trois familles de modèle (simulation sans modélisation des règles de décision du producteur, simulation à base de règles et d'optimisation du revenu) présentées ci-dessus se distinguent par la manière dont elles représentent l'acteur et ses décisions. Schématiquement, les outils d'optimisation se fondent sur une vision du décideur proche de la théorie économique néo-classique, à savoir capable de choisir la solution maximisant sa fonction d'utilité parmi une large gamme de possibilités grâce à la complétude de l'information dont il dispose et à sa capacité de comparer toutes les solutions possibles (Duke *et al.*, 2012 ; Salassi *et al.*, 2013). Les deux autres familles se veulent plus proches des processus réels de décision

des acteurs. Elles ne privilégient pas une rationalité donnée et mettent l'accent sur les objets manipulés par les producteurs (sol, climat, parcelle, animal, équipement, etc.) pour atteindre leurs objectifs de production. Elles se différencient par la manière dont les règles de décision sont prises en compte dans le modèle. Les règles de décision sont généralement des entrées dans le premier modèle (modèle de simulation sans modélisation des règles de décision du producteur) et sont modélisées dans le deuxième modèle (modèle de simulation des règles de décision du producteur).

Chaque famille possède ses promoteurs, mais il est rare de voir plusieurs outils relevant de familles différentes utilisés en parallèle et comparés à l'échelle de l'exploitation agricole. Ceci est encore plus vrai lorsqu'il est question d'accompagnement des producteurs en Afrique de l'Ouest, alors que de nombreux auteurs annoncent, sans le démontrer en pratique, l'intérêt de leur outil pour cette fonction. L'accompagnement vise ainsi à mettre l'acteur ou le producteur au centre de la démarche de conception des innovations techniques et organisationnelles, en s'appuyant sur les savoirs locaux, les besoins et projets des acteurs ruraux, et leurs capacités à s'adapter (Toillier, 2012). Keating et McCown (2001) soulignent que les chercheurs devraient s'interroger sur la manière dont leurs outils seront utiles aux producteurs pour leurs prises de décision et la gestion de leurs systèmes de production. Dans ce contexte, il y a lieu pour la recherche de repenser voire réorienter ses outils de simulation et trouver un équilibre entre ses différentes approches de modélisation pouvant permettre l'accompagnement des producteurs à la conception de systèmes agropastoraux innovants. Une question découle au vu de ce qui précède :

**Sous quelles formes la modélisation permet-elle d'accompagner les exploitations à la co-conception de systèmes de production agropastoraux innovants et durables en zone cotonnière Ouest du Burkina Faso ?**

Pour répondre à cette question, trois outils de simulation du fonctionnement de l'exploitation agricole mais contrastés seront analysés. Il s'agit (i) d'un modèle « Cikeda », pour la simulation des performances technico-économiques annuelles de l'exploitation ; (ii) d'un modèle de simulation « Simflex », pour la simulation pluriannuelle des règles de décisions du producteur ; et (iii) d'un modèle de programmation linéaire à l'échelle de l'exploitation « Optimcikeda », pour la maximisation du revenu de l'exploitation.

D'autres interrogations et hypothèses découlent de la question centrale :

**Q1 :** Le thème de l'évolution et de la gestion de la fertilité des sols est à privilégier dans les scénarios à évaluer dans la mesure où il est crucial pour la durabilité des exploitations de l'Ouest du Burkina Faso. Ceci étant, au-delà des constats généraux et des déclarations des producteurs, ces exploitations rencontrent-elles réellement un problème de baisse de la fertilité de leurs sols ? Cet aspect a été évalué dans cette étude à travers les pratiques des producteurs de gestion de la fertilité chimique des sols, domaine sur lequel la recherche dans la zone a beaucoup focalisé ces activités (Sédogo, 1993 ; Berger, 1996 ; Lompo *et al.*, 2007).

**H1 :** Nous faisons l'hypothèse que les pratiques actuelles des producteurs de l'Ouest du Burkina Faso ne favorisent pas une amélioration de la fertilité chimique de leur sol.

**Q2 :** L'utilisation avec les producteurs de modèles à l'échelle de l'exploitation agricole peut – elle conduire à des changements de stratégies/ pratiques notamment en termes d'intégration agriculture – élevage ? Différentes stratégies d'intégration agriculture – élevage ont été développées par la recherche mais les niveaux d'intégration restent perfectibles. L'utilisation du modèle de simulation du fonctionnement de l'exploitation peut permettre d'analyser *ex-ante* les résultats de la mise en place des différentes stratégies d'intégration agriculture – élevage.

**H2 :** Une très bonne intégration de l'agriculture et de l'élevage à l'échelle des exploitations représente un moyen d'améliorer significativement la fertilité des sols.

**H2' :** Les modèles d'exploitation peuvent contribuer à améliorer la stratégie d'intégration agriculture-élevage du producteur.

**Q3 :** Quelles connaissances spécifiques apportent les différents types de modèles dans un processus de planification de la campagne agricole ? En utilisant les modèles de simulation et d'optimisation pour aider les producteurs à la conception de stratégies et à la planification de leur campagne agricole, cela favorise la discussion. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à des changements plus faciles à mettre en œuvre par les producteurs sur le court et moyen termes.

**H3 :** Chaque modèle de simulation apporte des connaissances spécifiques dans la conception et l'accompagnement des producteurs vers des changements agropastoraux à court et moyen termes.



## **1.5. Plan de la thèse**

Pour tester les quatre hypothèses avancées, nous avons structuré ce document en six chapitres. Le Chapitre 2, après une description de la zone d'étude, identifie les pratiques dans les systèmes de polyculture élevage et les contraintes majeures de production. Il présente également la démarche générale de l'étude. Cette démarche s'appuie sur l'utilisation de 3 modèles de simulation dans une optique d'accompagner 18 exploitations vers de nouvelles stratégies de productions agropastorales. Le chapitre 3 présente les résultats d'un travail de caractérisation de l'état de la fertilité chimique des sols des 18 exploitations en lien avec leurs pratiques actuelles afin de mieux accompagner les producteurs dans la conception de stratégies nouvelles de gestion de la fertilité de leurs sols. Le chapitre 4, présente les différentes stratégies de production agropastorale co-conçues et simulées grâce au modèle de simulation Cikeda ainsi que les implications pour les producteurs à court et plus long termes. Le chapitre 5 présente une démarche ainsi que les résultats de l'utilisation des trois modèles avec les producteurs dans l'aide à la planification des activités agricoles des campagnes pluvieuses de 2011 et 2012. Il permet ainsi de vérifier l'hypothèse trois de cette étude. Enfin, le Chapitre 6 dresse un bilan critique de ce travail, et discute également de ses intérêts et ses limites, ainsi que les perspectives qui y sont associées.

## Chapitre 2 : Cadre de l'étude et démarche générale

### 2.1. Cadre de l'étude

#### 2.1.1. Zone d'étude

L'étude a été menée en zone cotonnière ouest africaine plus précisément au Burkina Faso dans la province du Tuy. Elle a concerné les villages de Koumbia et Waly (Latitude  $12^{\circ}42'20''$  Nord ; longitude  $4^{\circ}24'01''$  Est ; altitude 290 m) situés sur l'axe Bobo-Dioulasso - Ouagadougou (route nationale N°1), à 37 km au Sud-Ouest de Houndé (commune urbaine de la province) et à 67 km à l'Est de Bobo-Dioulasso (figure 1). Ces villages ont fait l'objet de plusieurs études durant les 9 années passées (Vall *et al.*, 2006 ; Blanchard, 2006 ; Vall et Diallo, 2009 ; Sempore *et al.*, 2011 ; Andrieu *et al.*, 2012).

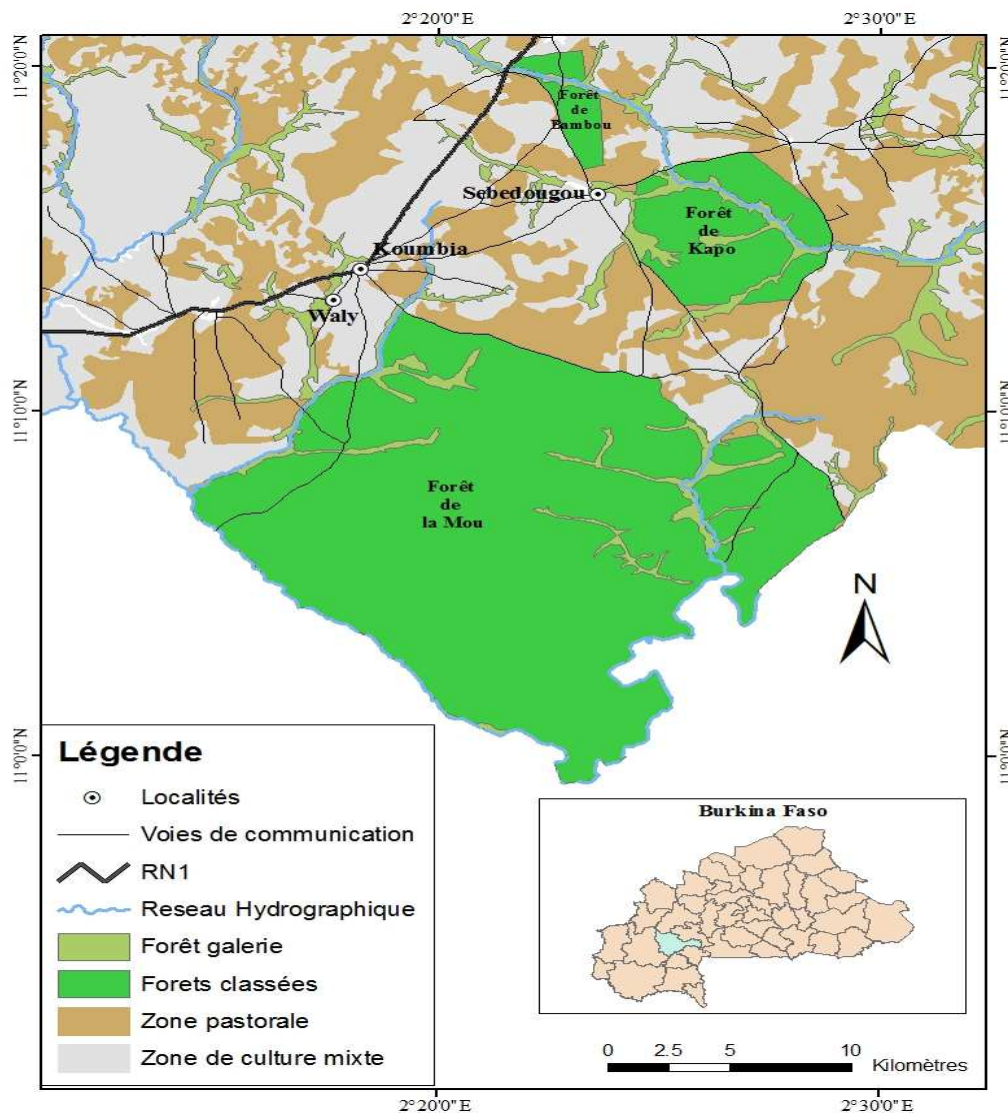
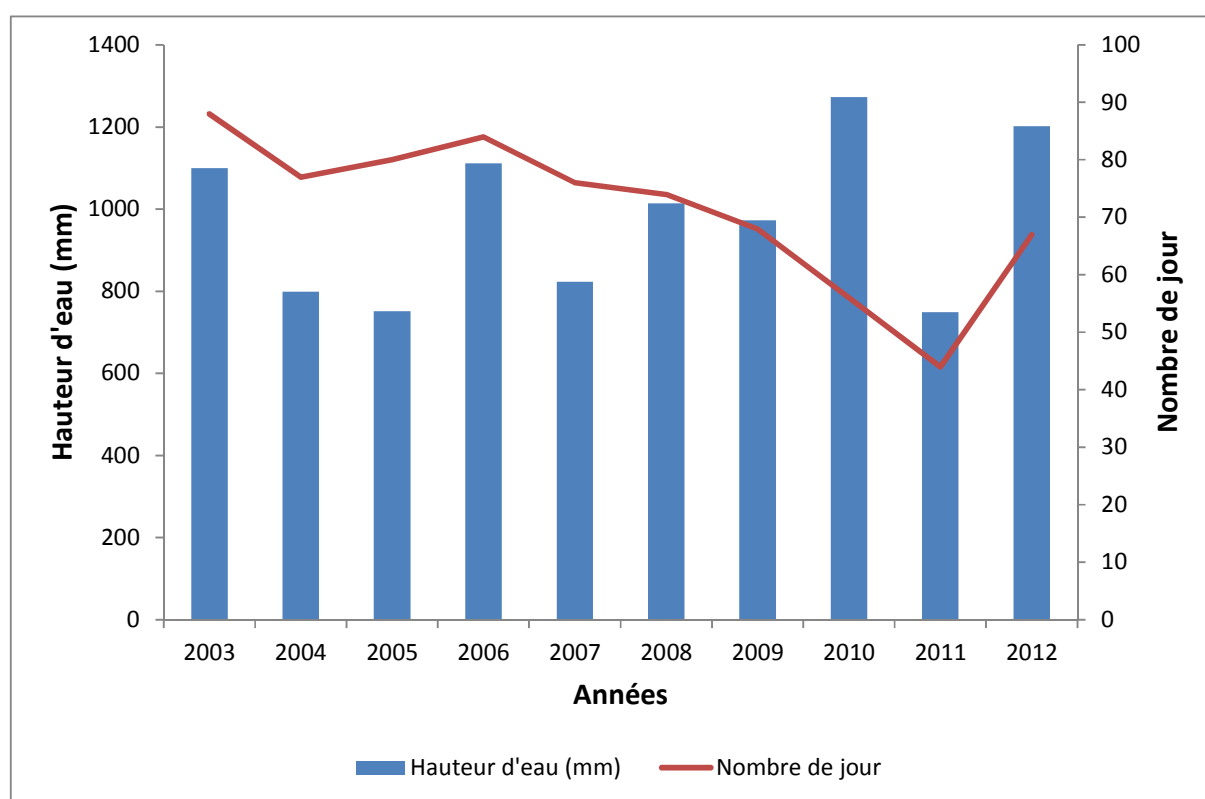


Figure 1 : Carte de la zone d'étude (Koumbia et Waly)

### 2.1.2. Climat

La province du Tuy est située dans la zone agro-climatique de type soudanien et est comprise entre les isohyètes 800 et 1000 mm/an (Vall et Diallo, 2009). Le climat de cette zone se caractérise par une saison des pluies qui va de mai à octobre, une saison sèche froide (octobre-février) et une saison sèche chaude (mars-avril).

La pluviométrie, souvent mal répartie, est très irrégulière d'une année à une autre (figure 2). Au cours des dix dernières années, la pluviométrie minimale enregistrée dans cette zone est de 749 mm contre 1273 mm comme pluviométrie maximale. On note ainsi des années dites excédentaires ou déficitaires en termes de pluviométrie. Les déficits pluviométriques occasionnent des retards de semis et peuvent fortement compromettre les rendements des cultures ainsi que les ressources fourragères de la province.



**Figure 2 :** Hauteur d'eau et nombre de jours de pluie entre 2003 et 2012 dans la station pluviométrique de Koumbia (source UDPC)

### 2.1.3. Sols

Les sols rencontrés dans la zone sont en majorité de type ferrugineux tropical lessivé et peu lessivé (30 % du territoire provincial), riches en dioxyde de fer, de couleur rouille et à valeur agronomique moyenne. On rencontre également (i) des sols bruns eutrophes (15 % du territoire provincial) riches en éléments alcalins et de bonne qualité pour l'agriculture ; (ii) des

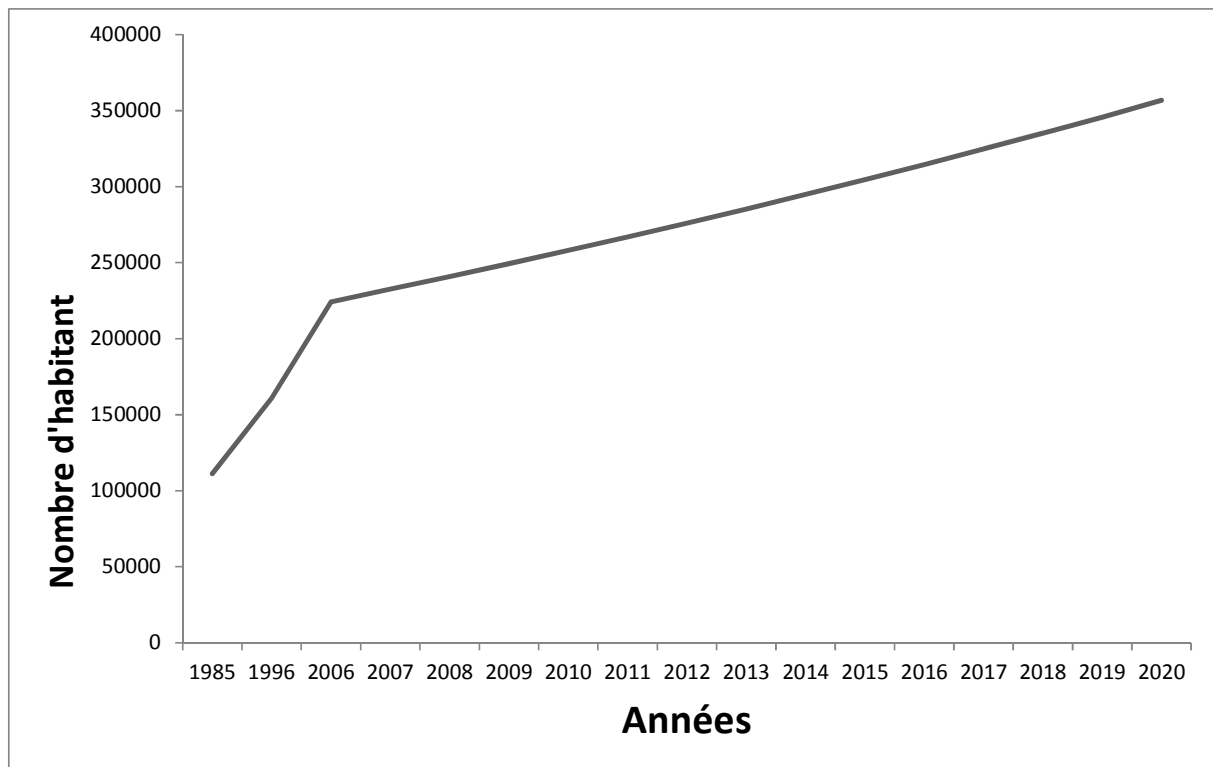
sols gravillonnaires qui sont un peu partout sur le territoire provincial et d'une valeur agronomique faible ; (iii) des sols sablo-argileux (moins 15 % de l'espace cultivable) ; et (iv) des sols hydromorphes sur les vallées des cours d'eau (Boulet et Leprun, 1969 ; Bunasols, 1985). Les cuirasses ferrugineuses et les affleurements de roches occupent 20% du territoire de la province (Badolo, 2009). Ils sont impropres à l'agriculture. Les terres cultivables représentent 50% du territoire et sont caractérisées par leurs teneurs très faibles en carbone, phosphore et azote et leur structure fragile (Lompo *et al.*, 2007).

#### **2.1.4. Végétation**

Les formations végétales de la province sont constituées de savanes arbustives et de savanes boisées. Il s'agit le plus souvent de formation secondaire résultant de l'action de l'homme et du feu. On note l'existence d'une forêt claire (la Mou) au niveau des villages étudiés et de plusieurs forêts galeries le long des cours d'eau. Les espèces ligneuses les plus fréquentes dans cette zone sont : *Parkia biglobosa*, *Detarium microcarpum*, *Anogeissus leioearpus*, *Khaya senegalensis*, *Faidherbia albida*, *Annus paradoxum*, *Adansonia digitata*, *Azelia africana*, *Trichilia emetica*, *Diospyros mespiliformis*, *Bombax costatum*, *Cassia spp*, *Lannea acida*, *Mitragyna inermis* (Blanchard, 2006).

#### **2.1.5. Population**

Au recensement de 2006, la province du Tuy comptait 224 159 habitants et avait une densité de la population de l'ordre de 39,8 habitants/km<sup>2</sup> (INSD, 2009). Selon la projection de l'INSD (2009), cette population devrait atteindre le nombre de 356 704 habitants à l'horizon 2020 (figure 3). De nos jours, la densité de la population est de 50,6 habitants/km<sup>2</sup>. Cette forte densité de la population a entraîné une forte pression sur les ressources naturelles. Les principales ethnies sont les Bwaba, les Mossi et les Peuhls. La population active pratique essentiellement l'agriculture et marginalement l'élevage. Les activités secondaires de la population concernent le commerce, l'artisanat, la pêche et la chasse.



**Figure 3 :** Evolution de la population de la province du Tuy de 1985 à 2020 (INSD, 2009)

### *2.1.6. Production agropastorale*

Les systèmes de production sont principalement composés de culture de céréales, de culture de rente en l'occurrence le coton et d'élevage de bovins et de petits ruminants. La culture céréalière est constituée principalement de celle du maïs avec 28 % de l'assolement et de celle du sorgho avec 13% de l'assolement. La culture du coton occupe 45% de l'assolement (Vall et Diallo, 2009). On note aussi la culture de légumineuses telles que le niébé et l'arachide qui occupent 5% de l'assolement.

Les activités d'élevage sont peu diversifiées et reposent principalement sur l'élevage de bovins. Les troupeaux appartiennent à des exploitations d'éleveurs ou d'agriculteurs et sont conduits quotidiennement au pâturage pour être alimentés grâce à la strate herbacée et quelques ligneux en fonction de la saison. En saison pluvieuse, les animaux d'élevage occupent principalement les collines et les cuirasses herbeuses. Ils occupent les bas-fonds durant les intersaisons et les champs de culture durant la saison sèche froide. Durant la saison sèche chaude, les animaux parcourent de longues distances pour le pâturage et leur alimentation est souvent complétée par les tourteaux de coton (sous-produit agro-industriel

principalement utilisé dans la zone). Certains producteurs pratiquent la transhumance en fin de saison sèche froide lorsque le pâturage est limité (Vall et Diallo, 2009).

La pression anthropique sur les ressources agro-sylvo-pastorales de la zone de Koumbia est élevée. L'emprise agricole a été estimée à 53% de la surface du territoire et la charge actuelle en bétail (0,48 ha/UBT/an) est légèrement supérieure à la capacité moyenne de charge (0,40 ha/UBT/an) (Vall et Diallo, 2009). Cette pression anthropique entraîne une compétition sur les espaces agro-sylvo-pastoraux villageois occasionnant des conflits fréquents entre les différents acteurs qui les utilisent (Vall *et al.*, 2006). Trois principaux types de producteurs ont été identifiés dans cette zone : les agriculteurs avec traction animale, cultivant du coton et des céréales destinées à l'autoconsommation et à la vente (78% des producteurs), les éleveurs peulhs (10%) semi-sédentarisés pratiquant l'élevage transhumant des bovins et une agriculture d'autosubsistance, les agro-éleveurs (12%) disposant d'une main-d'œuvre familiale importante pour cultiver de grandes surfaces, ayant constitué un noyau d'élevage grâce aux revenus du coton (Vall *et al.*, 2006).

## **2.2. Démarche générale**

### ***2.2.1. Outils de simulation utilisés***

Pour cette étude, nous avons identifié et retenu 3 types de modèles car : (i) ces modèles ont été élaborés à l'échelle de l'exploitation dans le contexte de la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso plus précisément celui de la province du Tuy ; (ii) ils sont relativement simples d'utilisation et peu exigeants en données d'entrées et de paramétrages ; et (iii) ils appartiennent aux trois familles de modèles identifiées précédemment.

Néanmoins les trois modèles ont été élaborés dans des optiques différentes. Cikèda (terme local désignant l'exploitation agricole) a pour but d'être utilisé pour accompagner les producteurs vers la conception de nouvelles pratiques agropastorales. Par contre, Simflex (en lien avec la flexibilité des producteurs) et Optimcikèda (en lien avec l'optimisation des ressources de l'exploitation) sont essentiellement faits pour analyser les pratiques, explorer des scénarios et faire des propositions aux producteurs sans nécessairement les impliquer dans les simulations. Nous présentons les trois modèles sur la base de leur objectif, de leur pas de temps, de la structure générale, ainsi que des entrées et sorties du modèle.

### 2.2.1.1. Modèle de simulation du fonctionnement de l'exploitation « Cikeda »

#### - Objectif du modèle

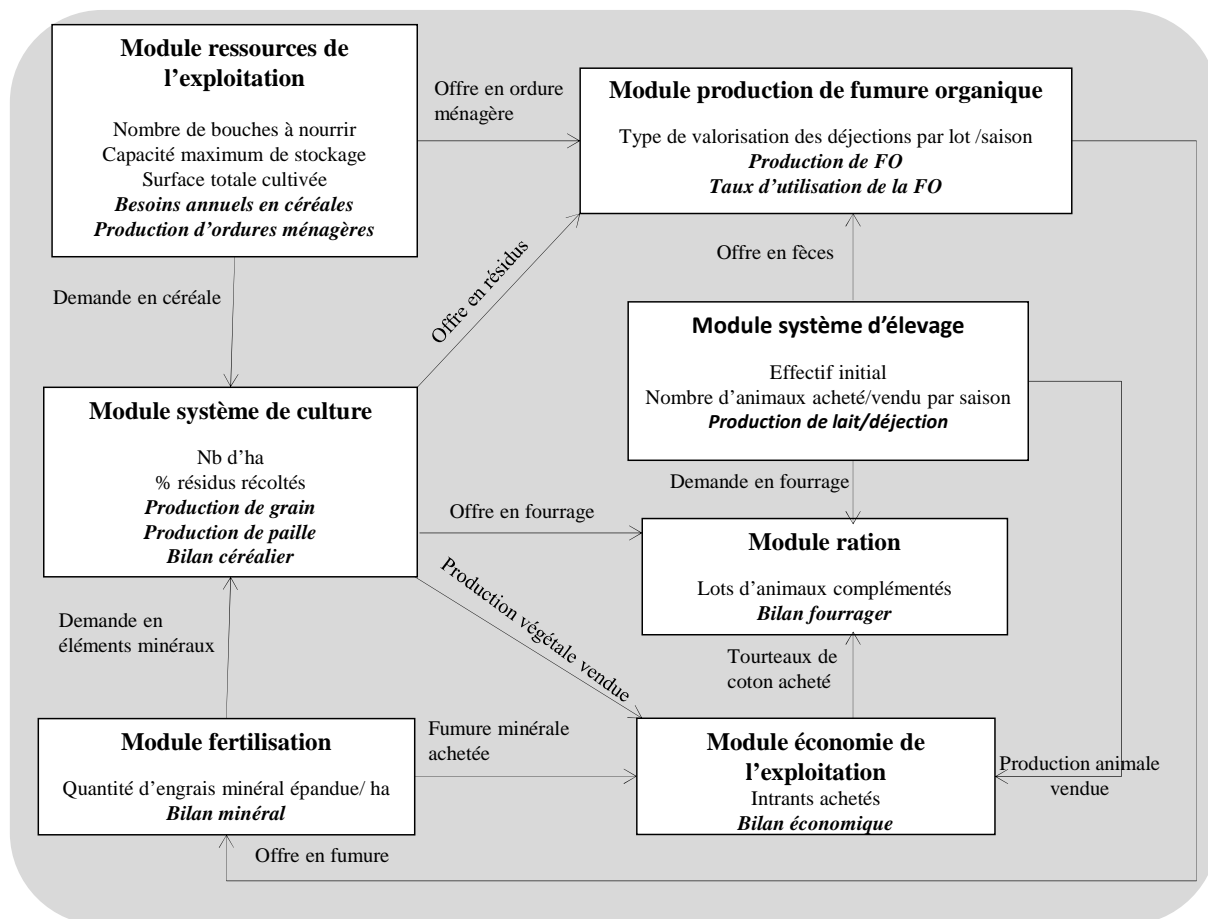
Le modèle simule le fonctionnement technico-économique d'une exploitation à l'échelle d'une année. Il permet d'analyser avec le producteur l'impact d'une transformation de l'exploitation liée par exemple à l'introduction d'un atelier d'embouche, la modification de l'assolement avec notamment l'introduction de culture fourragère, l'amélioration de la production de fumure organique, des capacités de stockage sur ses performances technico-économiques (Sempore *et al.*, 2011 ; Andrieu *et al.*, 2012).

#### - Pas de temps

Le pas de temps de ce modèle est annuel (du 1er mai au 30 avril de l'année d'après) mais l'année simulée est divisée en trois saisons : la saison pluvieuse, la saison sèche chaude, la saison sèche froide.

#### - Structure du modèle

Le modèle comporte sept modules reflétant les interactions entre systèmes de culture et d'élevage au sein des exploitations (figure 4). Il s'agit des modules (i) ressources de l'exploitation, (ii) système d'élevage, (iii) système de culture, (iv) ration, (v) production de fumure organique, (vi) fertilisation et (vii) économie de l'exploitation. Le modèle a été implémenté sous le tableur Excel qui est simple d'utilisation (Schaller, 2008).



Chaque case correspond à un module, son nom est précisé en haut de la case en gras, ses principales entrées sont normales, centrée, et ses principales sorties en gras et en italique ainsi que sous forme de flèches représentant les interactions entre modules. Les principaux bilans sont en gras et italique.

**Figure 4 :** Modèle conceptuel Cikèda représentant les différents flux entre les entrées et sorties des sept modules (Andrieu *et al.*, 2012)

#### - Entrées et sorties du modèle

Les entrées du modèle concernent les caractéristiques structurelles de l'exploitation (niveau d'équipement, le nombre de bouches à nourrir, la main d'œuvre familiale, la surface totale de l'exploitation et les capacités maximales de stockage de la fumure organique ou des résidus de récolte), les actions résultant des décisions stratégiques et tactiques ainsi que le type d'année climatique. Les actions renseignées par l'utilisateur concernent le choix d'assolement, les achats et ventes d'animaux, la part des résidus de culture disponibles récoltés, la complémentation éventuelle des animaux durant la saison sèche chaude, la valorisation ou non de la matière organique, les apports de fertilisants chimiques et les achats d'intrants.

Les sorties concernent le bilan alimentaire, le bilan minéral partiel, le bilan fourrager ainsi que le solde économique des activités agro-pastorales. Ces calculs sont réalisés pour trois types d'années climatiques (favorable, moyenne et défavorable) afin que le producteur apprécie les



risques associés à ses choix de production. Ces années climatiques sont définies selon les dires des producteurs en fonction de l'abondance et de la répartition des pluies dans l'espace et dans le temps.

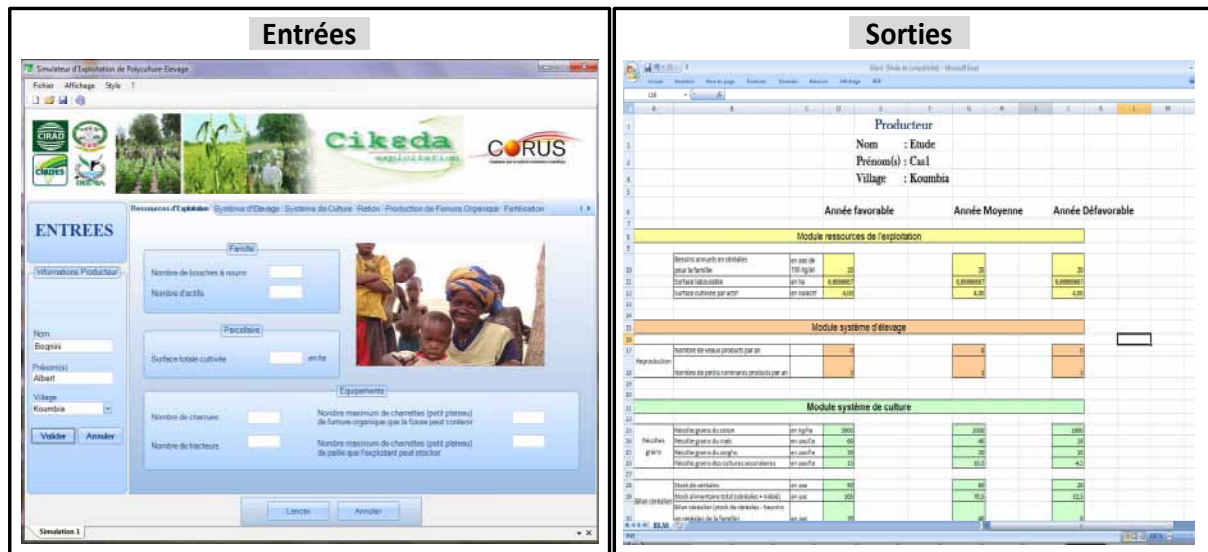
Le bilan céréalier des ménages correspondant à leur sécurité alimentaire est calculé en faisant la différence entre la production de céréales et le besoin en fonction de la taille de la famille déclarée en entrée. Les productions céréalières vendues sont évaluées une fois déduites les quantités autoconsommées (FAO, 2002). La production de céréales est fonction des surfaces de sorgho et de maïs déclarées par les producteurs en entrée que multiplie le rendement de ces cultures calculé par le modèle. Ce rendement varie en fonction du type d'année climatique et de l'élément minéral (N, P, K) apporté en quantité la plus limitante aux vues des besoins de la plante.

Le bilan fourrager est saisonnier et partiel. Il ne concerne pas les parcours naturels pâturés principalement en saison des pluies, ni les résidus de récolte consommés en vaine pâture. Il établit la différence entre, d'une part, l'offre en pailles et en fourrages cultivés produits sur l'exploitation, récoltés puis stockés et, d'autre part, les besoins fourragers des animaux (Centre Agro Entreprise, 2000) que le producteur souhaite compléter. Il est demandé au producteur d'estimer la proportion de pailles produites qu'il récolte en début de saison sèche froide en tenant compte de ses contraintes de main d'œuvre ou d'équipement. La quantité de pailles et fourrages effectivement stockée est limitée par la capacité maximale de stockage précisée par le producteur. Il s'agit d'une limite virtuelle permettant de tenir compte de contraintes relatives au transport des pailles récoltées jusqu'au lieu de stockage, ou à la dimension du fenil. Cinq lots d'animaux sont considérés : bœufs de trait, vaches laitières, taurillons et génisses d'élevage, bœufs d'embouche, petits ruminants. Les producteurs réservent la complémentation à certains groupes d'animaux, voire certains individus.

Le bilan minéral fait la différence entre l'offre et la demande d'éléments minéraux à l'hectare compte tenu, d'une part, des apports en engrais chimiques par culture et par hectare déclarés par le producteur, ainsi que de l'apport de fumure organique et, d'autre part, des besoins des cultures calculés par le modèle (Pieri, 1989). La fumure organique peut être de deux types : de la poudrette de parc ou du fumier. La production de fumure est calculée par le modèle en fonction des déjections produites par les animaux (CIRAD, 2002), des refus des stocks fourragers et des ordures ménagères de la famille (Tini, 2003 ; Sérémé et May, 2008). Le fumier est épandu prioritairement sur la sole de maïs, le reliquat étant épandu sur les soles de coton puis de sorgho.

Le lait vendu correspond à la production de lait calculée par le modèle en fonction de données d'enquêtes sur les quantités traitées, autoconsommées et, par différence, vendues. Les ventes d'animaux sont déclarées par le producteur. Le revenu est calculé en faisant la différence entre les productions végétales et animales vendues et les coûts estimés de main d'œuvre salariée, les achats d'animaux, d'intrants chimiques, les frais vétérinaires, d'aliment du bétail et de sel. Les dépenses sont enregistrées sur déclaration des producteurs. Le détail des calculs est présenté dans Andrieu *et al.* (2012).

La figure 5 présente l'interface des entrées et sorties du modèle Cikeda.



**Figure 5 :** Interfaces des entrées et sorties du modèle Cikeda

### 2.2.1.2. Modèle de simulation de la flexibilité des systèmes de production « Simflex »

- Objectif

Simflex permet d'analyser l'impact de différentes stratégies d'adaptation des producteurs à la variabilité climatique et économique sur les résultats de production (Andrieu et Chia, 2012). Il aide à (i) l'analyse des capacités d'adaptation des différents types de producteurs, à (ii) l'amélioration des capacités d'adaptation de ces systèmes, et à (iii) l'évaluation des impacts d'innovations sur ces capacités d'adaptation.

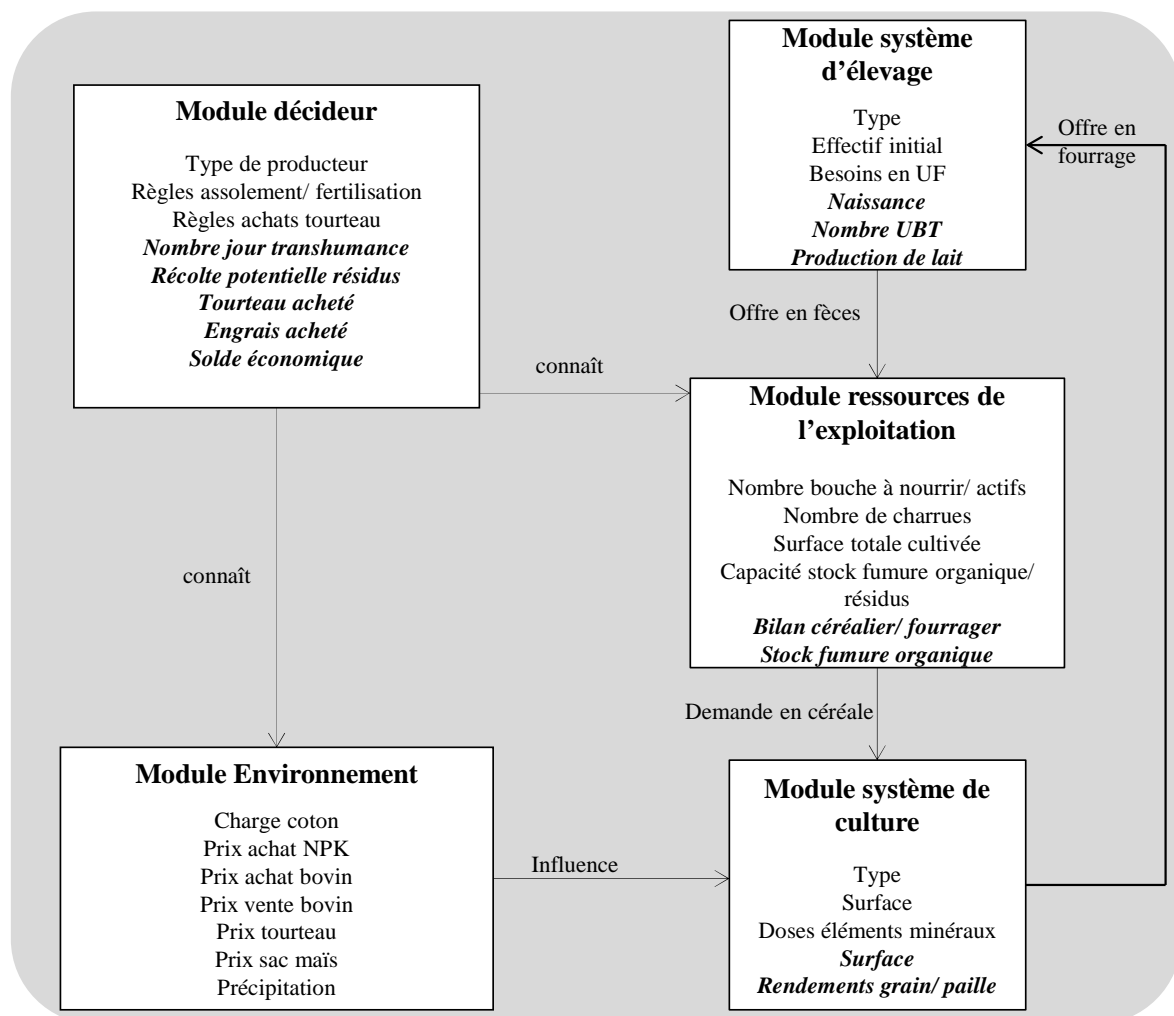
- Pas de temps

C'est un modèle qui fonctionne à un pas de temps annuel, les simulations étant pluriannuelles.

- Structure du modèle

Le modèle comprend deux sous modèles : un sous-modèle biophysique et un sous-modèle décisionnel (figure 6). Le sous-modèle biophysique est composé lui-même de différentes

classes ou modules : la classe environnement (climatique et économique), la classe lot, la classe parcelle, la classe culture, la classe bâtiment et la classe exploitation. Le sous-modèle décisionnel comprend six classes correspondant à six types de producteurs : un agriculteur flexible, un agriculteur peu flexible, un agro-éleveur flexible, un agro-éleveur peu flexible, un éleveur flexible et un éleveur peu flexible. La flexibilité est déterminée par l'existence de règles d'ajustement face à la variabilité de l'environnement, alors qu'un producteur peu flexible applique les mêmes règles de décision d'une année à l'autre. Le sous-modèle décisionnel simule chaque année les décisions de conduite des systèmes de culture et d'élevage. Chaque décision est décrite par une règle générale et une règle d'adaptation lorsque les conditions sont défavorables. Le modèle a été développé sous python qui est un langage orienté objet et disponible gratuitement (Andrieu et Chia, 2012).



Chaque case correspond à un module, son nom est précisé en haut de la case en gras, ses principales entrées sont normales, centrées, et ses principales sorties en gras et en italique ainsi que sous forme de flèches représentant les interactions entre modules. Les principaux bilans sont en gras et italique.

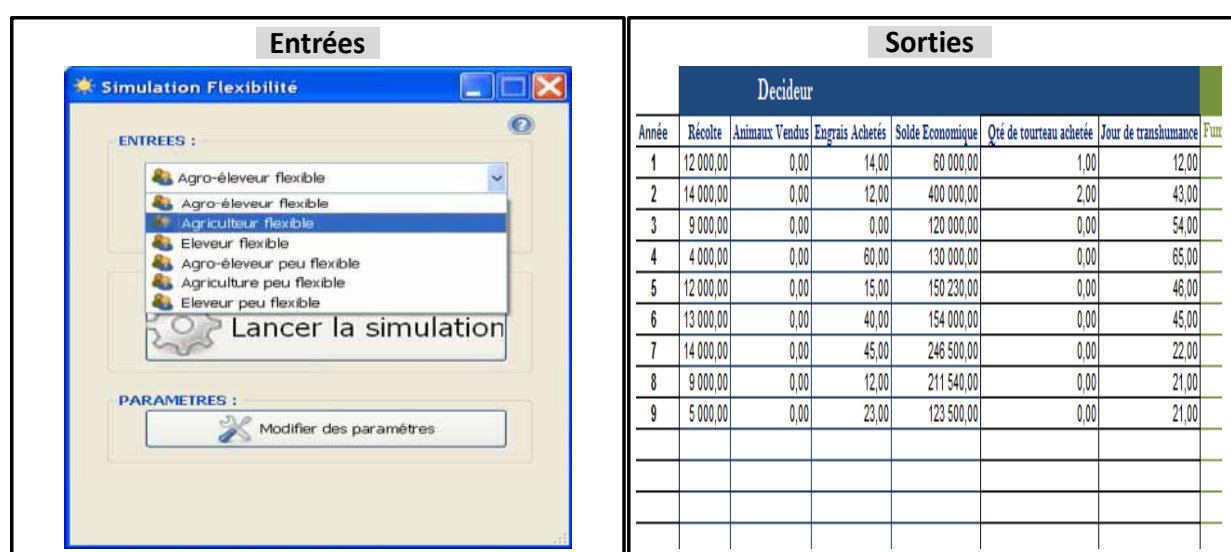
**Figure 6 :** Modèle conceptuel Simflex représentant les différents flux entre les entrées et sorties des sept modules (Andrieu et Chia, 2012)

- Entrées et sorties du modèle

Le modèle a deux principales entrées : les caractéristiques de l'environnement climatique (précipitations) et économique (prix des engrais, prix d'achat et de vente des bovins, prix d'achat des tourteaux) d'une part et les caractéristiques structurelles de l'exploitation d'autre part. Au niveau de l'environnement climatique et économique, le modèle utilise un fichier texte décrivant pour chaque année (i) la pluviométrie annuelle, (ii) le prix de vente du coton, (iii) le prix d'achat des engrais, (iv) le prix d'achat du tourteau, (v) le prix d'achat ou de vente des bœufs d'élevage.

La structure de l'exploitation est décrite par un autre fichier texte sur (i) le nombre d'actifs, (ii) le nombre de bouches à nourrir, (iii) la surface totale de l'exploitation, (iv) les effectifs initiaux du troupeau, (v) les capacités de stockage des résidus, (vi) les caractéristiques des parcelles (type de culture et surface, quantité initiale de biomasse, teneur initiale du sol en éléments minéraux).

Les interfaces des entrées et sorties sont présentées au niveau de la figure (figure 7).



**Figure 7 :** Interfaces des entrées et sorties du modèle Simflex

Les sorties sont pour certaines, identiques au modèle précédent : le bilan alimentaire, le bilan minéral, le bilan fourrager ainsi que le solde économique des activités agro-pastorales. Les sorties concernent également les décisions du producteur virtuel (le choix d'assolement, la fertilisation du maïs, la fauche des résidus, l'achat de tourteau et/ou le départ en transhumance du troupeau, la vente d'animaux) qui est fonction des données de l'environnement (prix des intrants, précipitations) et des différents bilans. Ainsi, différents types de producteurs peuvent être modélisés. Cela signifie qu'en fonction du type de producteur choisi par l'utilisateur, les

choix d'assolement, de fertilisation, de fauche, d'achat de tourteau, de départ en transhumance ou de vente d'animaux vont varier (Tableau I).

**Tableau I : Règles de décisions simulées (Andrieu et Chia, 2012)**

	<b>Agriculteur</b>	<b>Agro-éleveur</b>	<b>Eleveur</b>
Assolement	Si le prix du coton est inférieur à un seuil alors le producteur diminue d'un tiers sa surface en coton et augmente d'un tiers sa surface en maïs	Si le prix du coton est inférieur à un seuil alors le producteur abandonne la culture du coton et alloue la moitié de la surface au maïs et l'autre au sorgho	
La fertilisation du maïs	Si le prix des engrais est supérieur à un seuil alors le producteur n'achète pas d'engrais minéraux sur le maïs et n'apporte que de la fumure organique Sinon il apporte des engrais minéraux et la fumure produite		Si le prix des engrais est supérieur à un seuil alors le producteur n'achète pas d'engrais minéraux sur le maïs Sinon il apporte des engrais minéraux et la fumure produite
Vente de bovins	Lorsque le revenu est négatif le producteur vend suffisamment d'animaux pour rétablir l'équilibre du bilan économique		
Achat de tourteau	Lorsque le bilan fourrager est déficitaire et que le prix d'achat du tourteau est faible alors le producteur achète du tourteau lui permettant de combler le déficit fourrager, sinon il divise ses achats par 2		Lorsque le bilan fourrager est déficitaire et que le nombre d'animaux à vendre pour acheter la quantité nécessaire de tourteau pour combler le déficit fourrager est inférieure à 5 alors le producteur achète du tourteau, sinon il n'en achète pas
Départ en transhumance	-	-	Lorsque le bilan fourrager est déficitaire et que le nombre d'animaux à vendre pour acheter du tourteau est supérieur à 5 alors le producteur part en transhumance

### 2.2.1.3. Modèle de programmation linéaire « Optimcikeda »

#### - Objectif

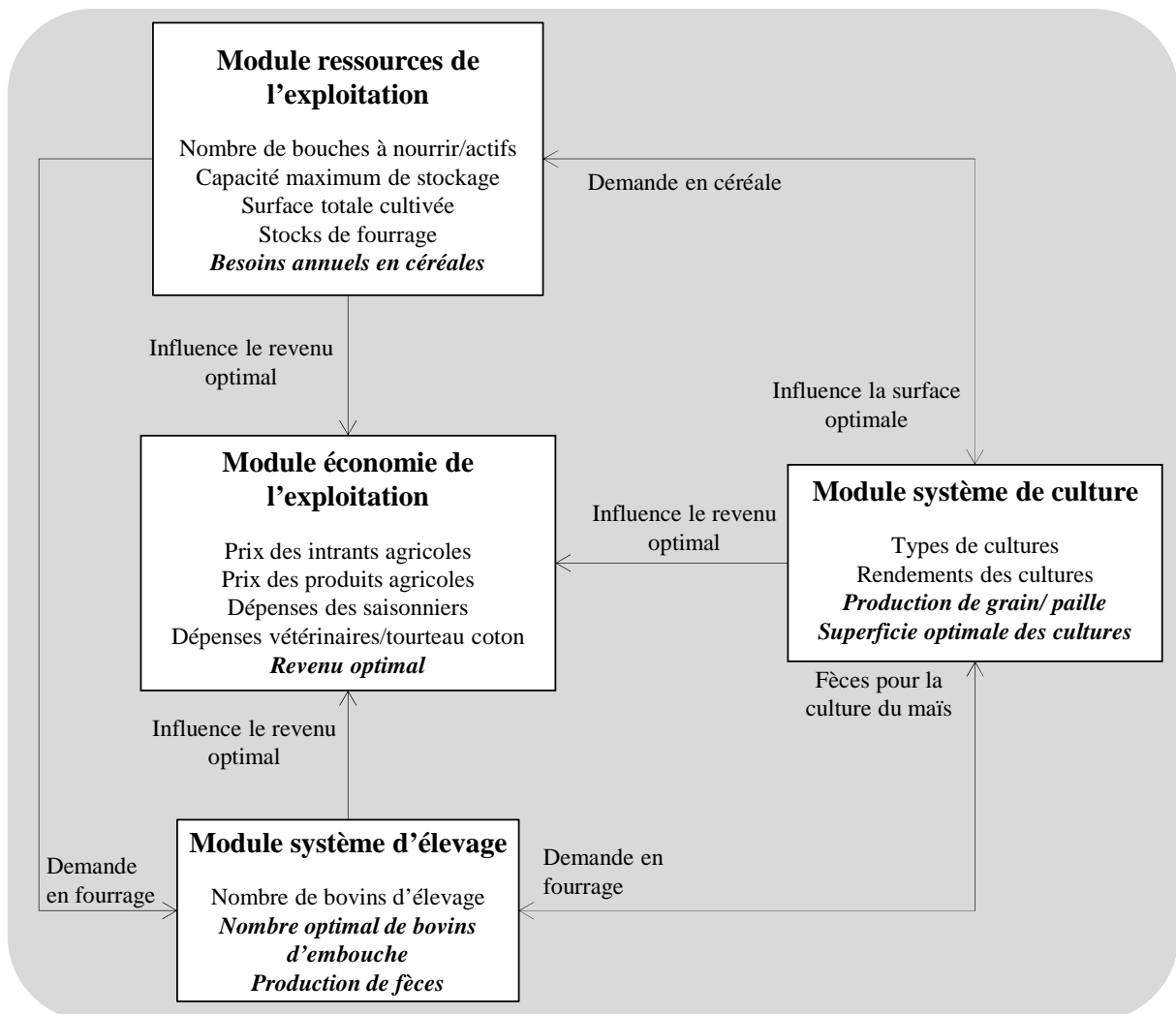
Le modèle de programmation linéaire a pour but d'optimiser l'allocation des ressources productives pour maximiser le revenu. Il permet alors de comparer la situation actuelle du producteur à la situation optimale. L'impact d'innovations sur l'allocation des ressources et le revenu peut également être testé.

#### - Pas de temps

Il fonctionne à un pas de temps annuel mais l'année simulée est divisée aussi en trois saisons comme au niveau du modèle Cikedà: la saison pluvieuse, la saison sèche chaude, la saison sèche froide.

- Structure

Ce modèle de programmation linéaire utilise trois grandes entités de l'exploitation : les ressources, les activités (objectif) et les productions (sorties). Ces trois entités de l'exploitation sont liées entre elles dans le modèle par des relations (mathématiques) de complémentarité (figure 8). Ainsi, les activités d'agriculture et d'élevage sont liées par des relations de complémentarité (production de fumier par les animaux pour la culture du maïs ou de résidus de récoltes pour l'embouche bovine). Le modèle a été construit avec le logiciel GAMS (General Algebraic Modeling System) car il permet de développer de façon conviviale ce type de modèle et a été utilisé par plusieurs auteurs en Afrique de l'Ouest dans le cadre de leur activité de programmation linéaire (Barbier, 1994 ; Ouedraogo, 2005).



Chaque case correspond à un module, son nom est précisé en haut de la case en gras, ses principales entrées sont normales, centrée, et ses principales sorties en gras et en italique ainsi que sous forme de flèches représentant les interactions entre modules. Les principaux bilans sont en gras et italique.

**Figure 8 :** Modèle conceptuel Optimcikèda représentant les différents flux entre les entrées et sorties des sept modules (Adapté de Zongo (2010))

## - Entrées et sorties

Les entrées concernent les ressources de l'exploitation considérées comme des contraintes techniques et les activités possibles de l'exploitation et leurs besoins unitaires en intrants. Les ressources sont constituées des terres (surface totale cultivée) de l'exploitation, de la main d'œuvre familiale, des stocks de fumure organique, de résidus de culture stockés, des besoins en intrants culturels à l'hectare, des charges vétérinaires par animal, de la main d'œuvre salariée, des animaux d'élevage et de trait. Ces ressources sont considérées comme des contraintes techniques pouvant restreindre la production dans l'exploitation. Les activités portent sur les différentes cultures possibles de l'exploitation et la pratique de l'embouche bovine.

Les sorties sont les allocations des ressources et les combinaisons de productions (assolement, choix d'intrants, complémentation) et les produits (récoltes, résidus de cultures, embouche bovine, fèces d'animaux) ainsi que le revenu. L'objectif du producteur est de maximiser son revenu sous différentes contraintes. Ainsi, le revenu tient compte, non seulement, des ressources, des contraintes et des produits, mais également des charges réelles et produits bruts des différentes cultures de l'exploitation. Le revenu est la valeur extrême de la combinaison linéaire des activités végétales (production de coton, de céréales et de légumineuses) et animales (embouche bovine) possibles soumises aux contraintes (ressources) de l'exploitation. Le revenu est donc la somme du revenu lié à la production végétale et de celui lié à la production animale. Chaque revenu (lié à la production végétale et animale) est déterminé par la différence entre le produit brut (meilleure combinaison) et le coût de production (des différentes productions végétales et embouche bovine). Le produit brut lié à production végétale (surtout céréalière) tient compte des besoins alimentaires des membres de l'exploitation. Ces besoins sont soustraits du calcul du revenu de l'exploitation. Pour l'embouche bovine, le modèle tient compte du nombre de bovins d'élevage de l'exploitation, du disponible en termes de fourrage, du disponible en sous-produit agro-industriel (qui sera acheté par le producteur) ainsi que des différentes cultures possibles dans l'exploitation qui sont des entrées du modèle. Ainsi, lorsque l'exploitation ne possède pas de bœufs d'élevage, le modèle ne planifie pas d'activité d'embouche bovine. Egalement, lorsque le disponible fourrager est limité pour la pratique de cette activité, cela oriente la combinaison du revenu vers la production céréalière essentiellement pour produire plus de fourrage pour l'embouche bovine. Les interfaces des entrées et sorties du modèle Optimcikedata sont présentées au niveau de la figure 9.

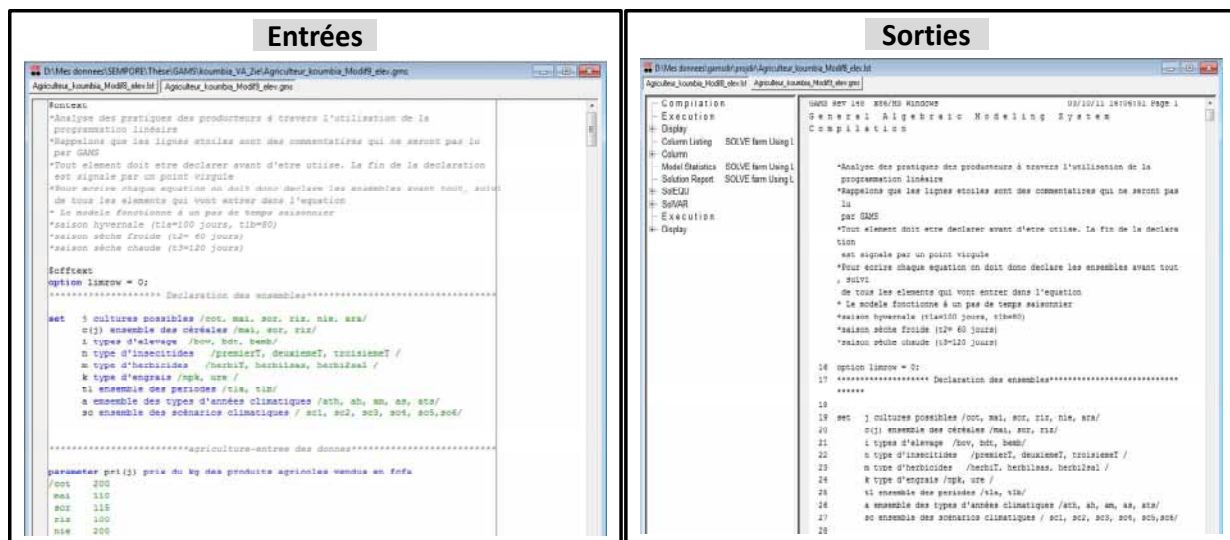


Figure 9 : Interfaces des entrées et sorties du modèle Optimciked

### 2.2.2. Choix des producteurs

L'étude combine une analyse compréhensive des pratiques actuelles des exploitations, une réflexion prospective et participative sur les évolutions possibles de ces exploitations et des suivis des activités agricoles. Pour ce type de recherche, elle s'est faite par étude de cas de chaque exploitation afin d'assurer la pertinence des résultats. Cette méthode a été utilisée par plusieurs auteurs pour différentes activités de recherche (Muchagata et Brown, 2003 ; Hostiou et Dedieu, 2009 ; Bernard *et al.*, 2011). Ainsi, cette étude s'est déroulée sur deux années et a concerné 18 exploitations (tableau II) des villages de Koumbia et Waly. Les exploitations ont été retenues sur la base de leur typologie, de l'intérêt du chef d'exploitation et de son dynamisme. Cette typologie des exploitations des villages de Koumbia et Waly découle des études de Blanchard (2006). De cette typologie nous retenons pour notre étude les 3 principaux types d'exploitations agricoles identifiés dans la zone et représentatifs de la diversité des exploitations : le type agriculteur, le type agro-éleveur et le type éleveur. Les agriculteurs de l'échantillon disposent d'une surface cultivée comprise entre 5 et 10 ha, sont équipés de 0 à 3 paires de bœufs et ont 0 à 4 bovins d'élevage. Ces exploitations ont peu d'actifs (3 à 8 actifs) et de personnes à charge par actif. Les agro-éleveurs ont de grandes surfaces (13 à 83,5 ha), sont bien équipés en traction animale (3 à 16 bœufs de trait) et ont développé un noyau d'élevage bovin (2 à 156 bœufs d'élevage). Ces exploitations ont un nombre d'actifs et de personnes à charge élevé (9 à 50 actifs). L'agriculture est plus orientée vers le marché agricole et l'élevage constitue un capital sur pied dans l'exploitation. Quant aux éleveurs, ils possèdent un cheptel de grande taille (16 à 100 bœufs d'élevage) et



pratiquent l'agriculture sur 1,25 à 8 ha pour l'autoconsommation. La famille est composée de très peu d'actifs et de personnes à charge (2 à 5 actifs).

**Tableau II** : Caractéristiques structurelles des exploitations

<b>Exploitation</b>	<b>Activité Principale</b>	<b>Nombre actif</b>	<b>STC (ha)</b>	<b>Nombre BT</b>	<b>Nombre BE</b>
A1C	A	6	10	6	0
A2C	A	8	7,75	2	0
A3S	A	3	4,75	2	4
A4S	A	4	6,25	1	0
A5O	A	4	5,5	2	0
A6O	A	4	5	4	1
<b>Moyenne A</b>	<b>A</b>	<b>4,83</b>	<b>6,54</b>	<b>2,83</b>	<b>0,83</b>
AE1C	AE	45	43	7	15
AE2C	AE	50	83,5	9	34
AE3S	AE	14	13	3	25
AE4S	AE	9	17	6	2
AE5O	AE	17	42	16	156
AE6O	AE	13	15,5	4	4
<b>Moyenne AE</b>	<b>AE</b>	<b>5</b>	<b>35,67</b>	<b>7,50</b>	<b>39,33</b>
E1C	E	3	5,5	4	70
E2C	E	2	3,25	2	100
E3S	E	5	3	4	25
E4S	E	4	5,5	2	25
E5O	E	5	8	4	66
E6O	E	3	1,25	2	15
<b>Moyenne AE</b>	<b>E</b>	<b>3,67</b>	<b>4,42</b>	<b>3,00</b>	<b>50,17</b>

A : Agriculteur ; AE : Agro-éleveur ; E : Eleveur ; STC : Superficie Totale Cultivée ; BT : Bovin de Trait ; BE : Bovin d'Élevage.

### 2.2.3. Démarche d'utilisation des modèles

Les 18 producteurs ont été subdivisés de manière aléatoire stratifiée, en trois sous-échantillons correspondant aux trois types de producteurs. A l'intérieur de chaque sous échantillon, on a deux exploitations par type (tableau III). L'objectif a été de distinguer l'impact spécifique de chaque outil sur les stratégies et pratiques des producteurs selon leur type durant les deux années de l'étude. Il a également facilité la compréhension acquise par chaque producteur sur l'outil utilisé avec lui.

Des entretiens ont été menés auprès des 18 producteurs lors de la phase initiale de cette étude afin (i) d'évaluer les connaissances technico-économiques actuelles des producteurs sur leur production agricole ainsi que (ii) leurs modes de gestion de la fertilité du sol.

**Tableau III** : Nombre d'exploitations par modèle

Echantillons	Optimciked	Ciked	Simflex			
Echantillon de 18 producteurs	2A } 2AE } 2E }	Lot1 x 2 ans	2A } 2AE } 2E }	Lot2 x 2 ans	2A } 2AE } 2E }	Lot3 x 2 ans

A : Agriculteur ; AE : Agro-éleveur ; E : Eleveur, Lot1 est différent du Lot2 différent du Lot3 pour chaque modèle.

#### 2.2.3.1. Evaluation des connaissances technico-économiques des producteurs

L'enjeu de cette étude est d'évaluer l'évolution des connaissances des producteurs à travers la comparaison des connaissances initiales avec celles obtenues après utilisation des modèles.

Nous avons à l'aide d'un guide d'entretien, recueilli les connaissances sur :

- les processus techniques de production végétale et animale ;
- les modes d'évaluation économique de la production végétale/ animale de l'exploitation ;
- les conséquences environnementales de l'exploitation agricole ;
- les liens entre les composantes du système de production.

Ces mêmes paramètres ont été recueillis lors de la phase finale d'utilisation des modèles.

#### 2.2.3.2. Evaluation des modes de gestion de la fertilité du sol

Cette étude avait pour finalité la co-conception des stratégies innovantes d'intégration agriculture – élevage via le modèle de simulation (sans modélisation des règles de décision du producteur) en rapport avec les pratiques actuelles des producteurs et les recommandations de la recherche. Ainsi, les informations suivantes sur les modes de gestion actuelle de la fertilité du sol par les producteurs ont été recueillies à l'aide d'un guide d'entretien chez l'ensemble des producteurs :

- l'historique des parcelles cultivées par les producteurs ;
- les modes d'exploitation des parcelles cultivées ;
- l'année de constat de la baisse de la fertilité du sol des parcelles de culture ;
- les modes de gestion de la baisse et/ou du maintien de la fertilité du sol ;
- les modes d'apport de la fumure organique et de la fumure minérale ;
- les connaissances des producteurs en matière de recommandations de gestion de la fertilité du sol par la recherche-développement.

Pour évaluer le niveau de fertilité chimique des sols des 18 exploitations des villages de Koumbia et Waly en fonction des pratiques, des prélèvements de sols ont été effectués à la fin

de la campagne agricole de 2011. Nous avons prélevé 40 échantillons de sol sur les parcelles des principales cultures (coton, maïs, sorgho) et des analyses ont été effectuées au Laboratoire d'Etude et de Recherche sur la Fertilité du sol (LERF) de l'IDR/UPB.

#### *2.2.3.3. Utilisation des modèles en situation d'aide à la planification des activités agricoles des producteurs*

Les trois modèles ont été utilisés avec les trois types de producteurs (tableau III) dans un but d'aide à la planification des campagnes agricoles 2011/2012 et 2012/2013.

Cette utilisation des modèles avait pour objectif spécifique de susciter la discussion entre le producteur et l'utilisateur du modèle, en l'occurrence le chercheur, sur les résultats issus des différentes simulations des scénarios de planification de la campagne agricole à venir. Cette discussion devant aboutir in-fine à une analyse des intérêts et limites des modèles conçus et utilisés en zone cotonnière Ouest du Burkina. La démarche reposait sur plusieurs étapes allant de la phase de diagnostic, d'identification de scénarios, de simulation et de présentation/discussion des résultats avec les producteurs.

Par ailleurs, nous avons utilisé au cours de la campagne 2011/2012, le modèle Cikedra pour co-concevoir avec les producteurs différentes stratégies d'intégration agriculture – élevage.

## **Chapitre 3 : Pratiques actuelles et fertilité chimique des sols dans les exploitations de Koumbia et Waly**

La dégradation de la fertilité des sols dans les zones cotonnières du Burkina Faso est susceptible de compromettre la durabilité des systèmes de production. Dans la zone cotonnière ouest du Burkina Faso, la mise en culture des sols se traduit par une perte annuelle de 2 à 4% de la matière organique, pour atteindre le seuil de non réponse aux engrais minéraux, après douze à quinze ans de culture continue (Berger *et al.*, 1987 ; Dakouo, 1991 ; Hien *et al.*, 1994). La durabilité des systèmes de culture et des systèmes de production exige une gestion rationnelle de la fertilité des sols, qui est loin d'être assurée à cause de l'insuffisance des restitutions organiques (Ouédraogo *et al.*, 2006). Cette étude se propose d'évaluer la fertilité chimique des sols en lien avec les pratiques actuelles des producteurs afin de mieux co-concevoir des innovations agropastorales.

### **3.1. Méthodologie**

#### **3.1.1. Choix des parcelles d'étude**

Cette étude a été menée dans les villages de Koumbia et Waly et a concerné 40 parcelles des 18 exploitations (6 agriculteurs, 6 agro-éleveurs et 6 éleveurs) retenues dans cette localité. Ces parcelles ont été retenues en fonction de la culture précédente (coton, sorgho, maïs), des apports ou non de fumure organique et minérale. Ainsi, un diagnostic préliminaire basé sur l'historique des parcelles (précédents culturels, apports de fumure organique et minérale, superficie) a permis de prélever 40 échantillons de sol. Les prélèvements ont été effectués sur les parcelles de coton, de sorgho et maïs qui ont ou pas bénéficié d'apport de fumure organique. Ainsi, sur la même exploitation les prélèvements de sol variaient de 1 à 3 échantillons. Ces prélèvements de sol ont été réalisés à l'aide de la tarière, à la profondeur de 0-20 cm. Le tableau IV présente le nombre de parcelles qui ont fait l'objet de prélèvements de sol. Sur ces parcelles, les échantillons de sol ont été prélevés suivant les diagonales, en points distants de 50 à 80 mètres en fonction de la superficie de la parcelle. Les sols ainsi prélevés sur la même parcelle ont été mélangés pour constituer des échantillons composites qui ont été séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm.

**Tableau IV** : Nombre de parcelles/ type de producteur/ pratiques de fertilisation (année 2011)

<b>Apport Fumure Organique (FO) + fumure minérale</b>				
<b>Type de producteurs</b>	<b>Nombre Parcelle</b>	<b>Quantité FO (t.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Dose NPK (kg.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Dose Urée (kg.ha<sup>-1</sup>)</b>
Agriculteurs	5	1,8	120	50
Agro-éleveurs	5	0,53	130	50
Eleveurs	7	1,9	71	28
<b>Moyenne</b>		<b>1,41</b>	<b>107</b>	<b>43</b>

<b>Apport fumure minérale seule</b>				
<b>Type de producteurs</b>	<b>Nombre Parcelle</b>	<b>Quantité FO (t.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Dose NPK (kg.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Dose Urée (kg.ha<sup>-1</sup>)</b>
Agriculteurs	4	0	137	50
Agro-éleveurs	9	0	144	50
Eleveurs	0	0	0	0
<b>Moyenne</b>		<b>0</b>	<b>140</b>	<b>50</b>

<b>Sans apport de fumures (organique et minérale)</b>				
<b>Type de producteurs</b>	<b>Nombre Parcelle</b>	<b>Quantité FO (t.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Dose NPK (kg.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Dose Urée (kg.ha<sup>-1</sup>)</b>
Agriculteurs	3	0	0	0
Agro-éleveurs	2	0	0	0
Eleveurs	5	0	0	0
<b>Moyenne</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

*FO : fumure organique*

*Le détail du tableau IV est présenté en annexe 2.*

### **3.1.2. Paramètres mesurés**

Les caractéristiques chimiques suivantes ont été déterminées sur les échantillons prélevés à l'horizon 0-20 cm : le carbone, l'azote total (N), le pH<sub>eau</sub> et le pH<sub>KCl</sub>. Nous avons évalué la matière organique (M.O) du sol ainsi que le rapport C/N. Ces éléments et calculs intermédiaires ont été retenus car ils font partie des éléments majeurs de la détermination de la fertilité chimique des sols. Les analyses ont été effectuées dans le Laboratoire d'Etude et de Recherche sur la Fertilité du sol (LERF) de l'IDR/UPB.

### **3.1.3. Analyses chimiques des sols**

- pH du sol

Le pH<sub>eau</sub> et le pH<sub>KCl</sub> du sol ont été mesurés par lecture directe au pH-mètre à électrode en verre, selon un rapport sol/solution de 1/2,5. L'eau et le KCl 1N sont utilisés après un temps d'équilibre de 4 heures (McLean, 1982). L'acidité d'échange a été extraite par une solution de KCl 1N et titrée avec du NaOH (Houba *et al.*, 1995) .

- Carbone organique et matière organique

Le carbone organique est déterminé par la méthode Walkley et Black (1934). L'oxydation à froid de l'échantillon de sol par une solution de bichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ), en présence d'acide sulfurique, est suivie d'un dosage colorimétrique de  $Cr^{3+}$ . Le taux de la matière organique est estimé en appliquant à la teneur en carbone organique déterminée un coefficient multiplicateur de 1,7 :

$$MO(\%) = C \text{ organique } (\%) \times 1,724$$

- Azote total

L'azote est dosé par la méthode Kjeldahl (Hillebrand *et al.*, 1953). Après minéralisation avec l'acide  $H_2SO_4$  et  $C_7H_6O_3$  en présence de  $H_2O_2$ , et du sélénium utilisé comme catalyseur, la solution aqueuse est mélangée à du carbone actif. Les éléments azotés sont ensuite déterminés par la méthode au réactif de Nessler.

### ***3.1.4. Analyses de données et présentation des résultats***

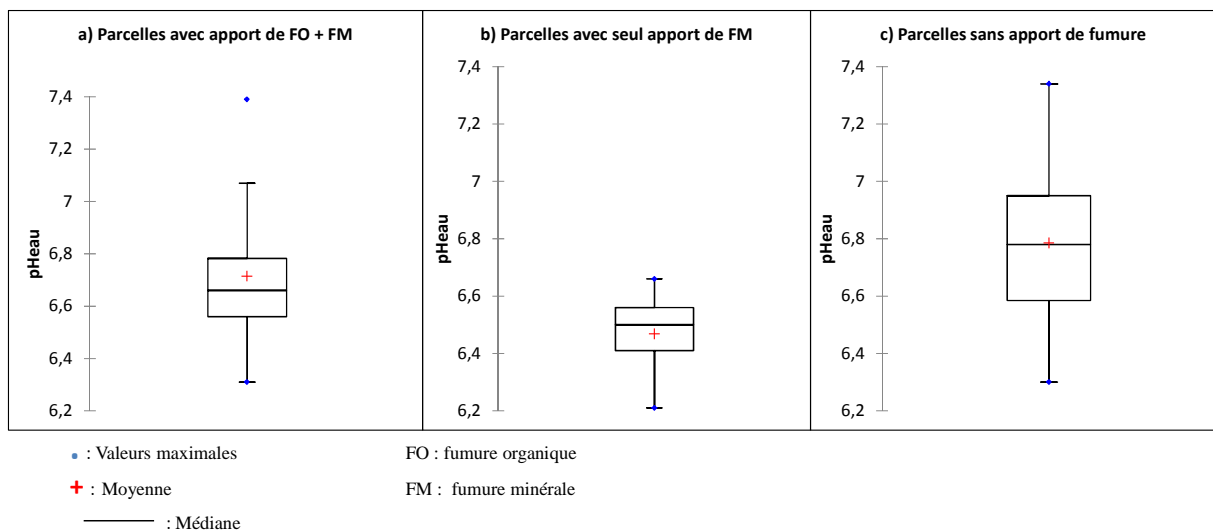
Les analyses statistiques des données ont été effectuées avec les logiciels XLSTAT Version 2012.6.07 et MS/EXCEL. Nous avons utilisé MS/EXCEL pour saisir les données et générer les graphiques notamment les box-plots. Ces box-plots permettent de représenter la distribution d'une variable en une seule dimension. Ils sont ainsi constitués de valeurs maximale et minimale, d'une médiane (valeur qui est au centre de la distribution) et d'une moyenne. Une analyse de variance (ANOVA) a été effectuée sur les données pour mieux comprendre les effets des pratiques de fertilisation (avec et sans apports de fumure organique et minérale) et les types de producteurs (agriculteurs, agro-éleveurs et éleveurs) sur les propriétés chimiques des sols mesurées ( $pH_{eau}$ , M.O, N et C/N). Le test de Fisher a été utilisé pour la séparation des moyennes lorsque l'analyse de variance révèle des différences significatives entre les types de pratiques de fertilisation et types de producteurs, au seuil de probabilité de 5%. Les résultats ont été scindés en deux parties. La première partie présente l'analyse de l'effet des pratiques de fertilisation (avec et sans apports de fumure organique et minérale) sur les propriétés chimiques du sol notamment le  $pH_{eau}$ , le taux de matière organique du sol (M.O), l'azote (N) et le rapport C/N. La deuxième partie présente l'analyse des types de producteurs (Agriculteurs, agro-éleveurs et éleveurs) sur les mêmes propriétés chimiques du sol.

## 3.2. Résultats

### 3.2.1. Effet des pratiques de fertilisation sur les propriétés chimiques du sol

#### 3.2.1.1. Acidité des sols et pratiques de fertilisation

Les valeurs moyennes en  $\text{pH}_{\text{eau}}$  des sols des trois types de fertilisation (combinaison fumures organique et minérale, fumure minérale seule, sans fumure) sont comprises entre 6,46 et 6,78 (figure 10). Les sols ayant reçu un apport combiné de fumure organique et minérale ainsi que ceux n'ayant pas reçu de fumure ont une acidité proche de la neutralité. Ceux ayant reçu la fumure minérale seule sont légèrement acides selon la classification de Pallo et Thiombiano (1989). On note une différence significative entre l'acidité des sols ayant bénéficié d'un apport combiné de fumure organique et minérale et ceux ayant reçu la fumure minérale seule (tableau V). Egalement il y a une différence significative entre l'acidité des sols avec apport seul de fumure minérale et ceux sans apports. On ne note pas de différence significative entre l'acidité des sols sans apports de fumure et ceux avec apport combiné de fumures (tableau V).



**Figure 10 :**  $\text{pH}_{\text{eau}}$  des sols en fonction des pratiques de fertilisation (avec apport de fumure organique et minérale ; avec apport seul de fumure minérale ; sans apport de fumure)

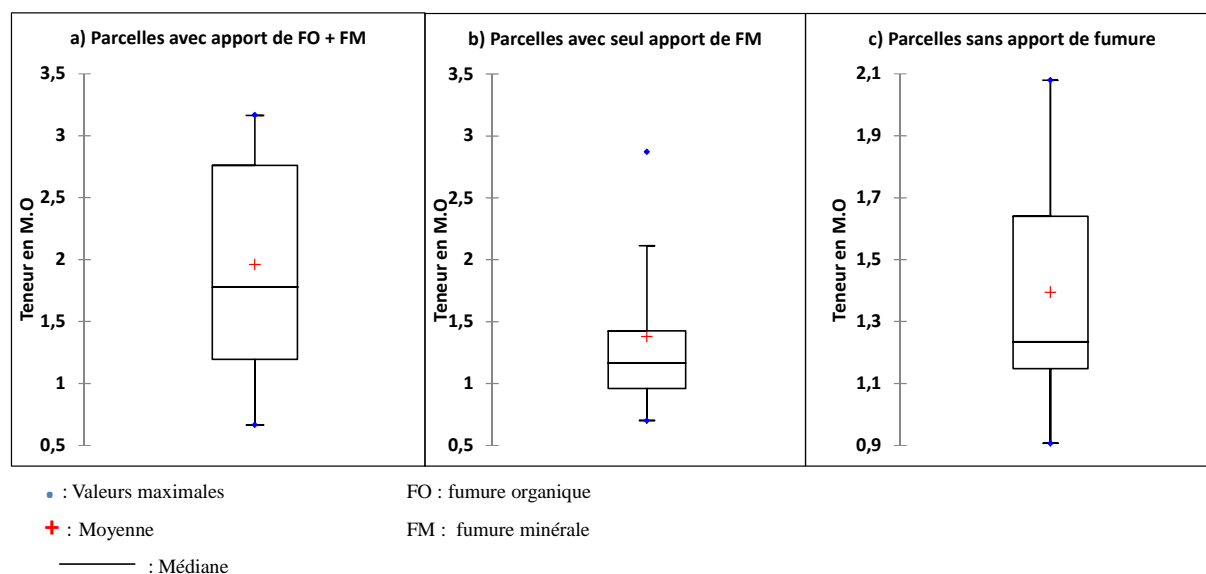
**Tableau V:** Pratiques de fertilisation et propriétés chimiques des sols

Pratiques de fertilisant	$\text{pH}_{\text{eau}}$	M.O (%)	N(%)	C/N
FO+FM	6,71 <sup>a</sup>	1,96 <sup>a</sup>	0,11 <sup>a</sup>	9,93 <sup>a</sup>
FM seule	6,46 <sup>b</sup>	1,37 <sup>ab</sup>	0,08 <sup>b</sup>	10,34 <sup>a</sup>
Sans apport	6,78 <sup>a</sup>	1,39 <sup>b</sup>	0,07 <sup>b</sup>	10,67 <sup>a</sup>
Probabilité (5%)	0,036	0,029	0,026	0,721
Signification	s	s	s	ns

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. ns : non significatif, s : significatif.

### 3.2.1.2. Teneur en matière organique des sols (M.O) et pratiques de fertilisation

Les teneurs moyennes en matière organique des sols varient entre 1,37% et 1,96% (figure 11). Celle des sols avec apport combiné de fumure organique et minérale est plus élevée que celle avec fumure minérale seule et celle sans apport de fumure. On note une différence significative entre la teneur en matière organique des sols ayant reçu un apport combiné de fumure organique et minérale et celle des sols n'ayant pas reçu de fumure (tableau V).



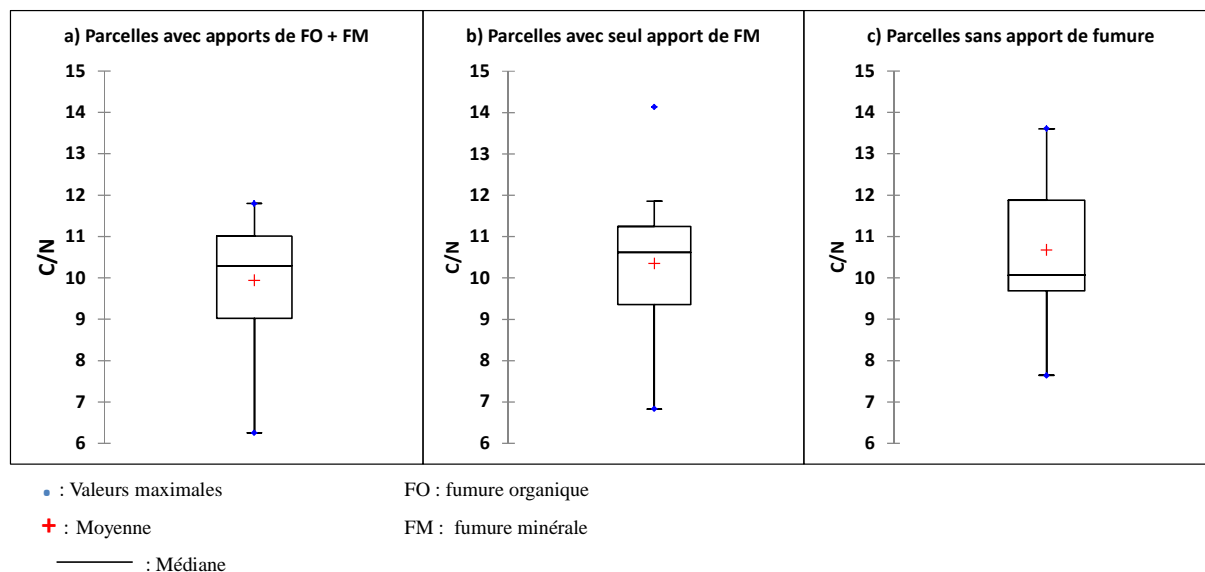
**Figure 11 :** Teneurs en matière organique (M.O) en fonction des pratiques de fertilisation (avec apport de fumure organique et minérale ; avec apport seul de fumure minérale ; sans apport de fumure)

### 3.2.1.3. Teneur en azote total, rapport C/N en fonction des pratiques de fertilisation

Les teneurs en azote total varient de 0,07% sur les parcelles n'ayant pas reçu de fumure à 0,11% sur celles ayant reçu des apports combinés de fumure organique et minérale (tableau V). On note une différence significative entre la teneur en azote total des sols ayant reçu des apports combinés de fumure organique et minérale et celle des sols n'ayant pas reçu de fumure ou ayant reçu la fumure minérale seule.

Les valeurs moyennes des rapports C/N des sols varient de 9,93 à 10,67 (figure 12). On ne note pas de différence significative entre les C/N des sols ayant reçu de fumure et ceux n'ayant pas reçu de fumure (tableau V).





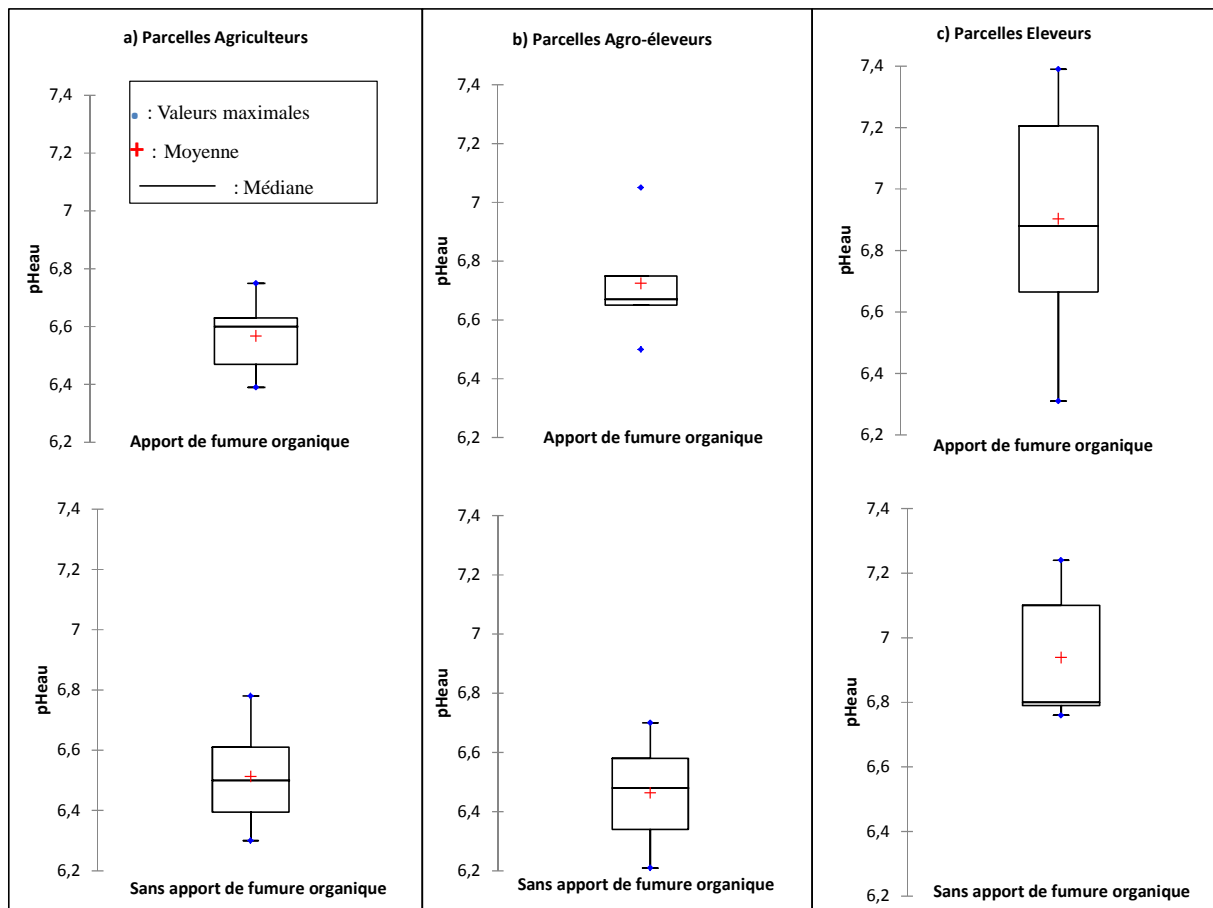
**Figure 12 :** Rapport C/N en fonction des pratiques de fertilisation (avec apport de fumure organique et minérale ; avec apport seul de fumure minérale ; sans apport de fumure)

### 3.2.2. Effet du type de producteur sur les propriétés chimiques du sol

Dans la première partie des résultats, nous avons montré de façon générale (tout type de producteur confondu) l'influence des différentes pratiques de fertilisation sur les propriétés chimiques du sol. Cette deuxième partie des résultats présente en fonction de chaque type de producteur, l'influence des pratiques de fertilisation organique sur les propriétés chimiques du sol. L'objectif visé est de fournir des renseignements concernant les propriétés chimiques des sols de nos trois types de producteurs rencontrés dans la zone d'étude.

#### 3.2.2.1. Acidité des sols des 3 types de producteurs

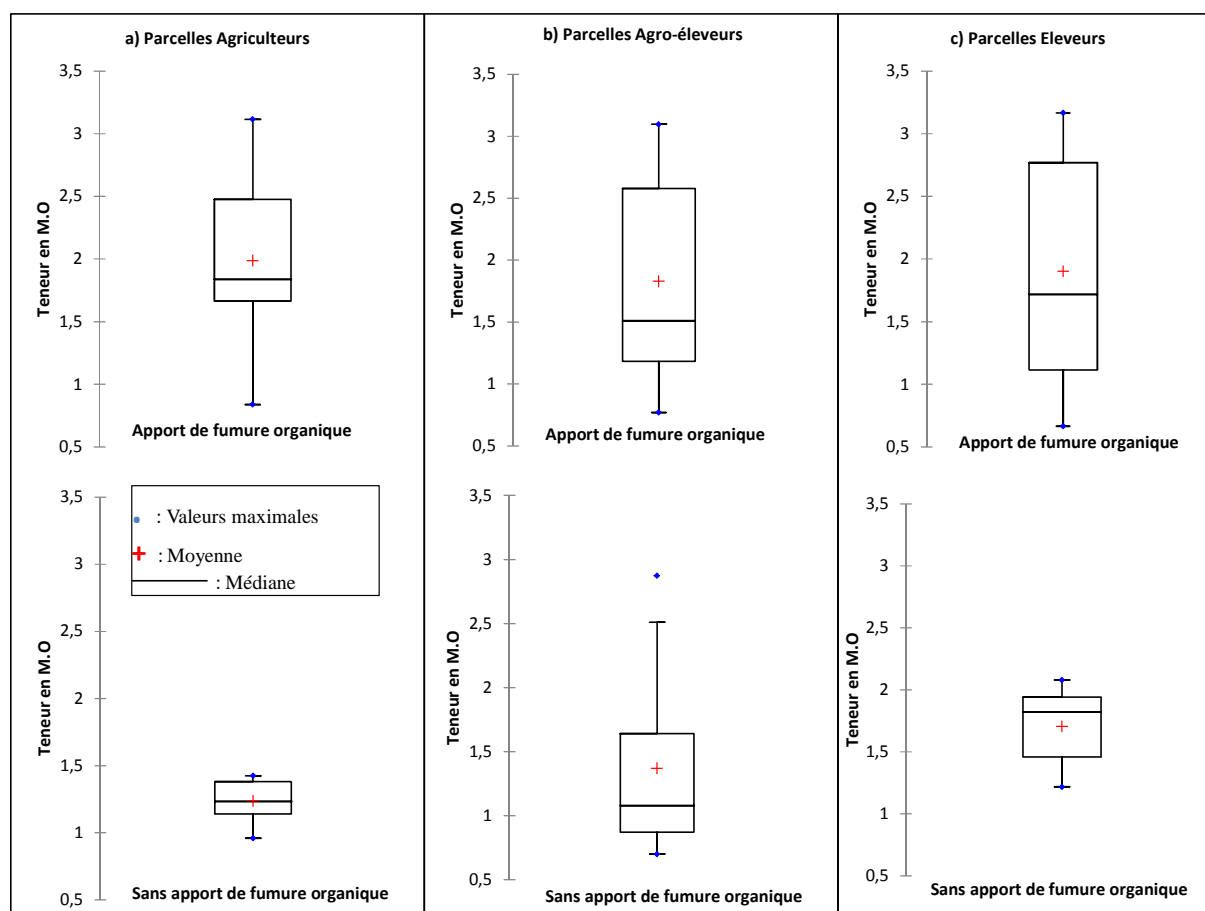
Les pH<sub>eau</sub> moyens des sols avec et sans apport de fumure organique des 3 types de producteurs varient dans l'ensemble entre 6,46 et 6,93 (figure 13). On note ainsi que les sols avec et sans apport de fumure organique des agriculteurs et des agro-éleveurs sont légèrement acides selon la classification de Pallo et Thiombiano (1989). Par contre, chez les éleveurs, même si les sols sont légèrement acides avec ou sans apport de fumure organique, ils sont beaucoup plus proches de la neutralité (figure 13). La teneur en acide des sols des trois types de producteurs sont statistiquement homogènes (tableau VI).



**Figure 13 :** pHeau des sols des 3 types de producteurs en fonction des pratiques d'apport et sans apport de fumure organique

### 3.2.2.2. Teneurs en matière organique (M.O) des sols des 3 types de producteurs

La teneur en matière organique des sols avec apport de fumure organique chez les 3 types de producteur est comprise entre 1,82 et 1,98% (figure 14). La teneur la plus élevée en MO a été notée sur les sols avec apports de fumure organique des agriculteurs tandis que la plus faible a été enregistrée pour les sols des agro-éleveurs. Toutefois, ces teneurs en M.O des sols des 3 types de producteurs, ne sont pas significativement différentes (tableau VI).



**Figure 14 :** Teneur en Matière organique (M.O) des sols des 3 types de producteurs en fonction des pratiques d'apport et sans apport de fumure organique

**Tableau VI:** pH<sub>eau</sub> et teneurs en matières organiques (M.O) et azote total (N) des sols des 3 types de producteurs

Eléments chimiques	pH <sub>eau</sub>		M.O (%)		N(%)		C/N	
	afo	sfo	afo	sfo	afo	sfo	afo	sfo
Agriculteurs	6,56 <sup>a</sup>	6,51 <sup>a</sup>	1,98 <sup>a</sup>	1,23 <sup>a</sup>	0,11 <sup>a</sup>	0,08 <sup>a</sup>	9,99 <sup>a</sup>	10,24 <sup>a</sup>
Agro-éleveurs	6,72 <sup>a</sup>	6,46 <sup>a</sup>	1,82 <sup>a</sup>	1,36 <sup>ab</sup>	0,10 <sup>a</sup>	0,15 <sup>b</sup>	10,29 <sup>a</sup>	10,48 <sup>a</sup>
Eleveurs	6,90 <sup>a</sup>	6,93 <sup>a</sup>	1,90 <sup>a</sup>	1,70 <sup>b</sup>	0,11 <sup>a</sup>	0,11 <sup>ab</sup>	9,31 <sup>a</sup>	11,45 <sup>a</sup>
Probabilité (5%)	0,083	0,487	0,661	0,009	0,845	0,039	0,241	0,896
Signification	ns	ns	ns	s	ns	s	ns	ns

*afo* : apport de fumure organique sur les parcelles ; *sfo* : Sans apport de fumure organique sur les parcelles. Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5% selon le test de Fisher. *ns* : non significatif, *s* : significatif.

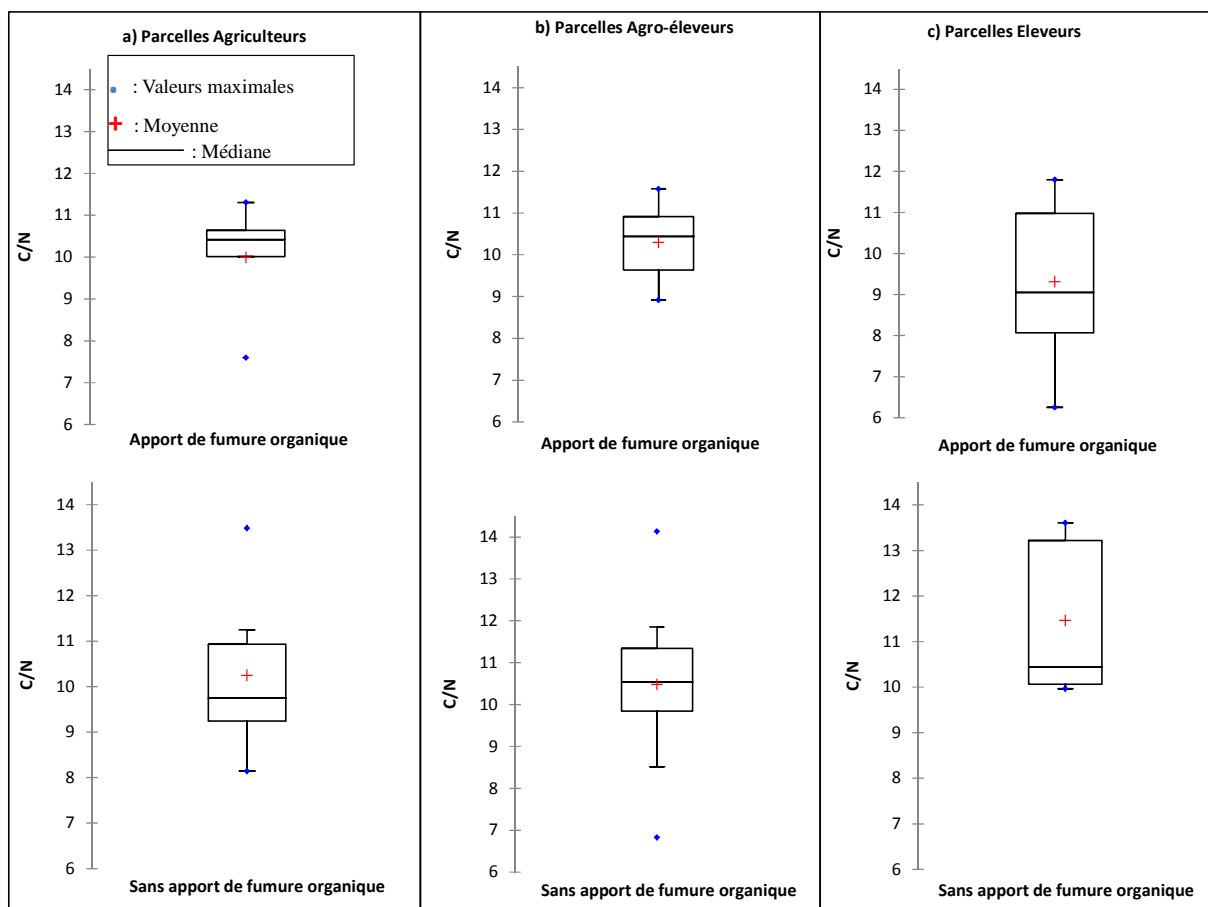
Les sols qui n'ont pas bénéficié d'apport de fumure organique ont des teneurs en M.O variant de 1,23 à 1,70% (figure 14). Chez les agriculteurs, la teneur moyenne des sols en M.O est inférieure à celles des autres types de producteurs. L'analyse statistique montre une différence significative entre la teneur moyenne des sols en MO des agriculteurs et ceux des éleveurs

(tableau VI). On ne note pas de différence significative entre la teneur moyenne en M.O des sols des agriculteurs et celle des agro-éleveurs et également entre celle des agro-éleveurs et celle des éleveurs.

### 3.2.2.3. Teneur en Azote (N) et rapport C/N des sols des 3 types de producteurs

Les teneurs en azote total (N) des sols avec apport de fumure organique sont de 0,11% pour les agriculteurs et éleveurs et de 0,10% pour les agro-éleveurs. Il n'y a pas de différence significative entre les 3 types de producteurs (tableau VI). Sur les sols sans apports de fumure organique, la teneur en azote total varie de 0,08% pour le type agriculteur à 0,15% pour le type agro-éleveur. On note une différence significative entre la teneur en azote total des sols du type agriculteur et celle du type agro-éleveur (tableau VI).

La valeur moyenne des rapports C/N des sols (tout type de producteur) avec apports de fumure organique, varie de 9,3 à 10,2. Celle des sols sans apports de fumure organique varie de 10,24 à 10,48 (figure 15). Aucune différence significative n'a été observée entre les types de producteurs qu'il y ait ou pas d'apport de matière organique (tableau VI).



**Figure 15 :** Rapport C/N des sols des 3 types de producteurs en fonction des pratiques d'apport et sans apport de fumure organique

### 3.3. Discussion

#### 3.3.1. *Pratiques de fertilisation et propriétés chimiques du sol*

Les résultats montrent sans surprise que les sols qui ont bénéficié d'un apport combiné de fumure organique et minérale sont faiblement neutres et contiennent plus de matières organiques et d'azote total que ceux sans fumure ou avec fumure minérale seule. De nombreuses études ont montré que lorsque les engrais minéraux sont combinés avec des amendements organiques, le risque d'acidification du sol est amoindri et on peut obtenir des systèmes de production plus durables et productifs (Bonzi *et al.*, 2004 ; Koulibaly *et al.*, 2009). En effet, l'utilisation de la fumure minérale seule n'est pas recommandée pour une production agricole à long terme car elle entraîne très souvent une diminution des teneurs en éléments nutritifs du sol, une diminution des teneurs en matière organique, une acidification des sols (Soltner, 2005 ; Bationo *et al.*, 2007). Par contre, la fumure organo-minérale permet d'améliorer les propriétés chimiques, physiques, biologiques des sols (Sédogo, 1993 ; Lompo *et al.*, 2009).

#### 3.3.2. *Types de producteurs et propriétés chimiques du sol*

L'ensemble des sols des trois types de producteurs sont de nature faiblement acides à faiblement neutres, et ne semblent pas être affectés par le type de producteur. L'analyse statistique n'a pas révélé une différence significative des  $pH_{eau}$  des sols des trois types de producteurs. Celle-ci est certainement liée aux modes de gestion de la fertilité des sols chez les trois types de producteurs. En effet, les faibles apports de fumure organique constatés sur les parcelles des producteurs n'ont pas permis de corriger l'acidité des sols des agriculteurs et agro-éleveurs (Sédogo, 1993 ; Bacyé *et al.*, 1998). Egalement, l'utilisation continue de la fumure minérale sur les parcelles de culture entraîne une minéralisation rapide de la matière organique et donc une tendance à l'acidification des sols (Berger *et al.*, 1987 ; Hien *et al.*, 1994 ; Bado *et al.*, 1997). Les rapports C/N de l'ensemble des sols des trois types de producteurs indiquent ainsi une minéralisation rapide de la matière organique dans le sol. Cette minéralisation rapide est remarquable sur les parcelles des agriculteurs et agro-éleveurs, car leurs sols ont une teneur en  $pH_{eau}$  faiblement plus acide que celle des sols des éleveurs. En effet, les parcelles des éleveurs sont généralement situées à côté des concessions et bénéficient des apports de déjections des animaux d'élevage qui y sont parqués. Plusieurs études ont montré une différence de fertilité du sol entre les parcelles proches des habitations et celles éloignées, qui serait liée aux amendements organiques. En effet, les parcelles proches

des habitations couramment appelées champs de cases sont plus fertiles que celles éloignées appelées couramment champ de brousse (Bonzi, 2002 ; Tittonell *et al.*, 2006).

Les sols des trois types de producteurs sont faibles en matière organique et en azote total car les teneurs en M.O sont inférieures à 2% selon les normes de la FAO (Pallo et Thiombiano, 1989). Cette faible teneur en M.O est en lien avec les faibles quantités de fumure organique apportées sur les sols : inférieures à 2 tonnes/ha. Egalement, Pieri (1989) a démontré qu'en Afrique subsaharienne les pertes d'azote sont considérables à cause certainement de l'effet des températures élevées, de la lixiviation, de l'érosion et du ruissellement. L'analyse statistique n'a pas révélé de différence significative entre les valeurs en M.O des sols avec apport de fumure organique des trois types de producteurs. On note tout de même la présence d'une quantité élevée de matière organique sur les sols avec apport de fumure organique chez les agriculteurs et éleveurs liée vraisemblablement à la quantité plus élevée de fumure organique apportée comparativement au type agro-éleveur (tableau VI). Sans apport de fumure organique, on remarque que les sols des éleveurs présentent un niveau de fertilité plus élevé que ceux des deux autres types de producteurs à cause certainement de la présence du troupeau au sein des exploitations et de l'effet de pratiques antérieures de fertilisation organique (parcage d'animaux). Dans les travaux de Freschet *et al.* (2008), les pratiques de parcage d'animaux la nuit sur les parcelles cultivées des éleveurs, permet d'élever le taux de matière organique du sol. Cette teneur diminue rapidement entre la première et la cinquième année de culture après parcage, mais reste significativement élevée jusqu'à la onzième année.

### **3.4. Conclusion partielle**

Cette étude a mis en évidence l'effet des pratiques de fertilisation sur la fertilité chimique des sols des 3 types de producteurs rencontrés dans la zone d'étude. Nous n'avons pas tenu compte de la qualité des différentes fumures organiques (fumier, compost, déjection) utilisées par les producteurs, ni des quantités apportées sur les parcelles. De même, l'analyse des pratiques de fertilisation n'a concerné que la campagne agricole 2011. Une deuxième étude sur les mêmes propriétés chimiques des sols pour la campagne agricole de 2012 allait permettre de confirmer ou d'infirmer nos résultats. Toutefois, on a pu noter que les sols des 3 types de producteurs sont en majorité faiblement acides à faiblement neutres et leur teneur en matière organique est faible. Une des perspectives de cette étude est de concevoir avec les producteurs des stratégies pouvant contribuer à améliorer durablement le niveau de fertilité de leurs sols. L'intégration agriculture-élevage fournit une piste pour améliorer durablement les

fertilités des sols et permet également dans ces zones de répondre aux besoins fourragers des animaux. Nous analysons dans le chapitre suivant comment un outil de simulation à l'échelle de l'exploitation agricole peut permettre de mettre en œuvre des stratégies innovantes basées sur l'intégration agriculture-élevage.

## **Chapitre 4 : Quelles stratégies pour améliorer l'intégration agriculture-élevage dans des exploitations de polyculture ouest-africaine ? Approches par simulation avec les producteurs**

L'intégration entre systèmes de culture et d'élevage dans les exploitations mixtes dominants en Afrique sub-saharienne apparaît depuis plusieurs décades comme l'alternative à privilégier pour améliorer durablement leur productivité. De nombreuses études décrivent les stratégies d'intégration agriculture-élevage mises en œuvre par les producteurs (Harris, 2002 ; Manlay *et al.*, 2004 ; Pretty *et al.*, 2011 ; Hilimire, 2011 ; Basu et Scholten, 2012), ou font des propositions de stratégies alternatives basées sur une meilleure valorisation des sous-produits de l'agriculture et de l'élevage (Tiftonell *et al.*, 2009). Mais peu de travaux sont consacrés à l'analyse de la mise en œuvre de ces stratégies alternatives par les producteurs.

Cette étude vise à évaluer avec les producteurs et par voie de simulation, l'efficacité de leurs stratégies actuelles et des stratégies alternatives d'intégration agriculture-élevage. L'étude se base sur une interaction avec un petit nombre de producteurs dans l'Ouest du Burkina-Faso.

### **4.1. Méthodologie**

#### ***4.1.1. Choix des producteurs et informations collectées***

Une approche par étude de cas a été adoptée pour sa pertinence dans ce type de recherche (Muchagata et Brown, 2003 ; Hostiou et Dedieu, 2009 ; Bernard *et al.*, 2011). L'analyse des pratiques actuelles a été réalisée avec les 18 exploitations représentatives des trois types de producteurs identifiés par Vall *et al.* (2006) dans les villages de Koumbia-Waly. Leurs connaissances et pratiques initiales en termes d'intégration agriculture-élevage ont été recueillies à l'aide d'entretiens semi-directifs (tableau VII). Un suivi des activités agricoles de 2011 a permis de mieux caractériser leurs pratiques. La traction animale étant largement adoptée par ces producteurs comme dans le reste de la zone d'étude, nous avons évalué le niveau d'intégration à partir de la production de fourrage et de fumure organique.



**Tableau VII** : Aspects des connaissances et pratiques des producteurs relevés par entretien

Connaissances des producteurs	Pratiques des producteurs
- Types de fourrages	- Stockage des différents types de fourrages
- Types de fumures organiques produites dans les exploitations	- Types d'animaux alimentés par le fourrage stocké au sein de l'exploitation
- Effets de la fumure organique sur la production végétale et le sol	- Productions de fumure organique au sein de l'exploitation
- Liens entre les différentes composantes des systèmes de production animale et végétale	

Nous avons ensuite choisi au sein des trois types de producteurs et sur la base de leur disponibilité et intérêt, six exploitations (2 par type), pour participer à une démarche de co-conception de stratégies alternatives d'intégration agriculture-élevage assistée par simulation numérique. Le tableau VIII présente les caractéristiques des six exploitations retenues pour cette étude. Différents scénarios ont été conçus et discutés lors d'entretiens individuels avec les producteurs avant la campagne agricole de 2012, et leurs pratiques ont été suivies durant cette campagne. La nature des changements opérés suite aux simulations a ainsi pu être analysée.

**Tableau VIII** : Caractéristiques structurelles et fonctionnelles des six exploitations

Caractéristiques	Exploitations					
	A1	A2	AE1	AE2	E1	E2
Nombre d'actifs	8	4	45	11	5	4
Superficie totale cultivée	7,75	6,5	45	17	3	5,5
Superficie en jachère (ha)	0	3,5	0	4	0	1
Age de l'exploitant (ans)	31	39	63	29	35	41
Nombre de fosses à compost	1	0	1	2	1	2
Nombre de parcs à bétail	1	1	2	2	1	1
Nombre de charrettes bovines/ asines	1	1	1	1	0	0
Nombre de bœufs de trait	2	2	7	6	4	2
Nombre de bœufs d'élevage	0	4	15	2	25	25
Nombre de petits ruminants	10	5	8	2	5	6
Pratique d'embouche bovine	non	non	non	non	non	oui
Année de constat de la baisse de la fertilité du sol	-de 5 ans					oui
	5 à 10 ans		oui	oui		
	+ de 10 ans	oui			oui	oui
Conséquences	Baisse de la production agricole		oui	oui	oui	oui

#### 4.1.2. Démarche d'interactions avec les producteurs

L'interaction individuelle entre producteur et chercheur est basée sur la méthode d'analyse de scénarios (Bood et Postma, 1997). Chaque scénario représente un futur possible pour

l'exploitation caractérisé par une configuration donnée de ses ressources et de ses activités. Deux types de scénarios sont co-construits successivement avec chaque producteur : (i) un scénario représentant la situation actuelle de l'exploitation en matière d'intégration agriculture-élevage ( $S_0$ ), puis (ii) un scénario projet ( $S_1$ ) basé sur l'analyse de  $S_0$ , visant à améliorer durablement la productivité de l'exploitation.  $S_0$  permet au producteur de s'approprier la démarche et d'évaluer la qualité de la représentation qui est faite de son exploitation, et au chercheur de calibrer certaines variables mal connues du producteur (prix des intrants et produits agro-pastoraux).  $S_1$  est évalué en comparant ses sorties avec celles de  $S_0$ , notamment en termes d'intégration agriculture-élevage mesurées à travers le bilan fourrager et la quantité de fumure organique apportée par hectare.  $S_1$  est ensuite évalué en fonction de la faisabilité des changements qu'il implique, eux-mêmes classés en trois types : structurel lorsque des éléments de structure de l'exploitation sont modifiés ; stratégique lorsque les modifications concernent les activités productives de l'exploitation ; tactique pour les changements de conduite des ateliers de production (Bradshaw *et al.*, 2004).

La démarche a été évaluée avec chaque producteur selon deux procédures. Les changements tactiques discutés ont été comparés aux pratiques effectives lors de la campagne agricole suivante sur la base des suivis des activités agricoles. Les changements structurels et stratégiques non directement implémentés durant la période d'interaction ont fait l'objet d'une évaluation par le producteur.

La complexité de mise en œuvre de chaque activité à travers les 3 grands groupes de changement par producteur a fait l'objet d'une évaluation par le producteur à l'aide d'une grille de notation : X pour changement jugé difficile à mettre en œuvre par le producteur ; □ pour changement jugé facile à mettre en œuvre par le producteur.

#### ***4.1.3. Analyses des données et présentation des résultats***

La caractérisation de l'état initial des connaissances des producteurs a été représentée sous forme schématique au niveau de la première partie des résultats en fonction du lien que le producteur établit entre les types de connaissances (besoins alimentaires des animaux, gestion de la fertilité du sol).

Certaines données collectées pour la caractérisation des pratiques d'intégration agriculture-élevage ont fait l'objet de calculs supplémentaires et représentées au niveau de la première

partie des résultats sous forme de box plots. Ainsi, nous avons calculé à partir des caractéristiques initiales de chaque producteur :

- *la quantité de fourrage stocké par UBT = Quantité de fourrage stocké/ Nombre d'UBT de l'exploitation*
- *le ratio des apports de fumure organique par ha = Quantité de fumure organique disponible sur l'exploitation/ superficie totale cultivée.*

Les autres données collectées (types de résidus cultureux, types de fumure organique) pour la caractérisation des pratiques d'intégration agriculture-élevage ont été représentées au niveau de la première partie des résultats sous forme d'histogrammes/ barres par types de producteurs.

Les résultats des différents scénarios ont été analysés en fonction des variables d'intégration agriculture-élevage. Nous avons fait des calculs supplémentaires à certaines sorties du modèle pour nous permettre d'analyser et d'interpréter plus finement les données sur les différentes entrées et sorties des scénarios simulés (S0 et S1). Ainsi, nous avons calculé les variables suivantes :

- *la capacité de stockage de la fumure organique par hectare de maïs cultivé (kg/ha) = Capacité de stockage de la fumure organique/ superficie de la culture du maïs ;*
- *la capacité de stockage de fourrage par UBT (kg/UBT) = capacité de stockage de fourrage/ Nombre d'UBT de l'exploitation ;*
- *la quantité de fumure organique épandue sur les parcelles de culture de maïs (kg/ha) = la quantité de fumure organique produite au niveau de l'exploitation/ superficie de la culture du maïs ;*
- *la proportion de fumure organique épandue sur toute la superficie totale cultivée = la quantité de fumure organique produite au niveau de l'exploitation/ superficie totale cultivée\*100.*

Par ailleurs, la sortie bilan économique de chaque exploitation a fait l'objet de calcul intermédiaire afin de prendre en compte le revenu par actif. Ainsi, le revenu par actif est le rapport entre le solde économique de l'exploitation sur le nombre d'actifs de l'exploitation.

La présentation des entrées du scénario  $S_1$  s'est faite pour la plupart sous forme de pourcentage de variation comparativement aux entrées du scénario  $S_0$  afin de mieux représenter les différents changements entre les deux scénarios.

Ainsi, le calcul du pourcentage de variation =  $(\text{Entrée } S_1 - \text{Entrée } S_0) * 100 / \text{Entrée } S_0$

Les entrées concernant les achats et ventes d'animaux du scénario  $S_1$  ont fait l'objet d'un simple calcul de différence du nombre d'animaux achetés et vendus entre les deux scénarios.

Nous avons présenté sans calculs supplémentaires les doses d'apports de fumure organique du scénario  $S_1$ .

Toutes les entrées du scénario  $S_1$  ont été consignées dans un tableau au niveau de la deuxième partie des résultats.

## **4.2. Résultats**

### ***4.2.1. Etat initial des connaissances et pratiques d'intégration agriculture-élevage***

Les connaissances et pratiques initiales des producteurs en matière d'intégration agriculture-élevage ont été regroupées en trois thèmes : l'alimentation du troupeau, la gestion de la fumure organique et l'adéquation entre production de fourrage et production de fumure organique.

#### *4.2.1.1. Alimentation des animaux*

Le fourrage stocké par l'ensemble des producteurs est destiné en priorité à l'alimentation des animaux durant la saison sèche chaude. Il est attendu de ceux-ci une production d'énergie (bœufs de trait), de viande (embouche bovine et de petits ruminants) ou de lait (vaches laitières). Par contre, les bovins non directement productifs possédés par les agro-éleveurs et éleveurs, se nourrissent en saison sèche chaude des résidus de biomasse présents sur le territoire, au risque d'être sous alimentés en année sèche.

La quantité de fourrage stockée est suffisamment élevée chez les agriculteurs pour nourrir leurs bœufs de trait et les maintenir dans une bonne forme pour démarrer les travaux de la campagne agricole dès les premières pluies (figure 16.a). En effet, un bovin de trait consomme en moyenne durant la saison sèche chaude 400 kg de paille de céréale (Centre Agro Entreprise, 2000). Par contre, la quantité de fourrage stocké par UBT 'productive' dans les exploitations des agro-éleveurs et éleveurs est beaucoup plus faible, témoignant d'un

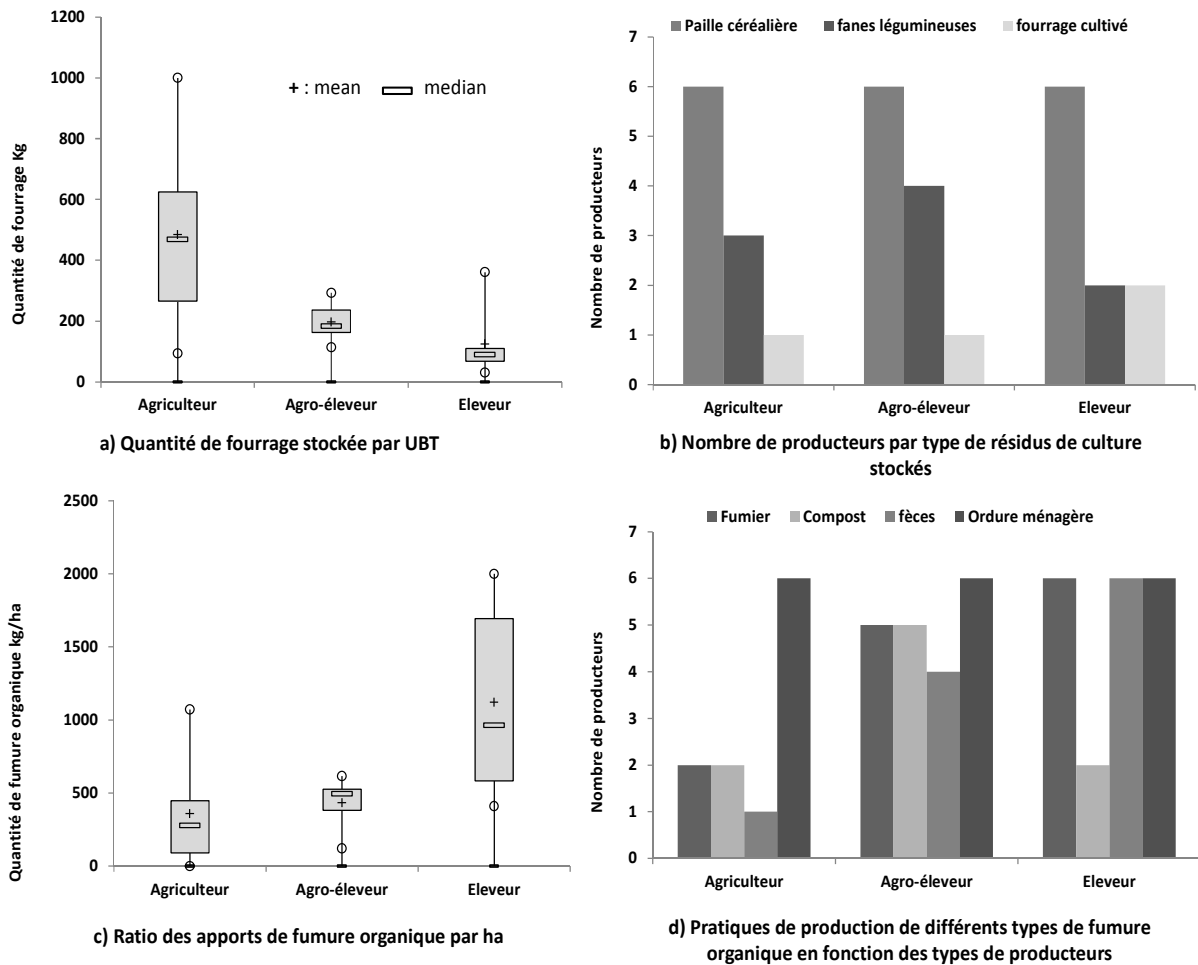
déséquilibre entre les besoins des animaux et les pratiques de production et de stockage de biomasse fourragère. Ces stocks sont essentiellement constitués de paille de céréales cultivées par tous les producteurs. Par contre, les cultures à forte valeur fourragère ne sont pas systématiquement utilisées (figure 16.b). Le stockage des fanes de légumineuses concerne un à deux tiers des exploitations selon les types. La culture de *Mucuna deeringiana* ne se rencontre que chez 22% des producteurs.

Ce déséquilibre quantitatif et qualitatif ne résulte pas d'une méconnaissance par les producteurs des qualités des différents fourrages. Il s'explique plutôt par l'insuffisance de la main d'œuvre et de l'équipement et la gestion commune des résidus de culture durant la saison sèche qui n'incitent pas les producteurs à planifier les quantités à stocker en fonction des besoins des animaux. Ceci entraîne de fréquents problèmes de déficit avec comme conséquence une plus forte mortalité des animaux durant cette période.

#### 4.2.1.2. Gestion de la fumure organique

Plusieurs types de fumure organique sont produits dans les exploitations étudiées, qui ont en commun de produire chaque jour des ordures ménagères (figure 16.d), souvent déposées en tas dans la concession ou mises dans une fosse avec d'autres résidus de culture et fèces d'animaux. Le compostage est pratiqué par la majorité des agro-éleveurs, mais seulement par un tiers des agriculteurs et des éleveurs, du fait du coût financier et de l'investissement en temps de travail que nécessite cette activité. Tous les éleveurs et une majorité d'agro-éleveurs récupèrent les fèces en parquant leurs troupeaux à proximité de l'habitation, ou directement sur les parcelles de culture.

Les effets de ces différents types de fumures (amélioration de la teneur du sol en nutriments, augmentation des rendements, lutte contre les mauvaises herbes telles que le *Striga sp.*, etc.) sont connus des producteurs. Leur valeur fertilisante est appréciée par la coloration du sol après épandage. Ces fumures sont généralement appliquées à des doses variables dans les champs de maïs (culture considérée comme exigeante), puis de sorgho et/ou de coton. La dose totale appliquée dépasse rarement une tonne par hectare cultivé (figure 16.c), bien loin des deux tonnes par hectare/an ou six tonnes par hectare tous les 3 ans recommandés par les services de vulgarisation dans cette zone. Les éleveurs apportent généralement plus de fumure organique sur leurs parcelles que les deux autres types car leurs charges animales par hectare cultivé sont élevées.

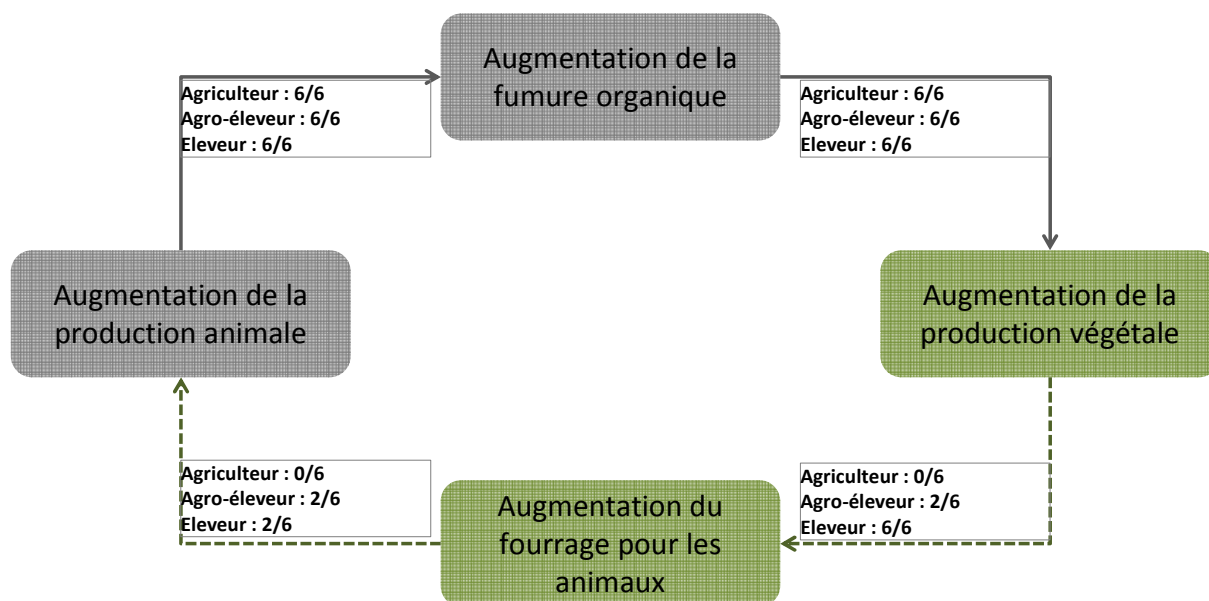


**Figure 16 :** Quantités de fourrage et de fumure organique stockées par type de producteurs et nombre de producteurs par type de résidus stockés et par type de fumure organique produite au sein des exploitations

#### 4.2.1.3. Adéquation entre production de fourrage et production de fumure organique

Tous les producteurs établissent un lien positif entre l'augmentation de la fumure organique produite et l'augmentation de la production végétale (rendement grain et paille) (figure 17). Ils reconnaissent qu'une augmentation de la taille du troupeau entrainera une augmentation de la fumure organique produite, qu'elle soit accumulée dans des parcs de stabulation ou sur les parcelles. L'ensemble des éleveurs (et seulement deux agro-éleveurs) associent l'augmentation de la production végétale à celle du disponible fourrager de l'exploitation, ce dernier pouvant lui-même être relié à une augmentation de la production animale. L'articulation des quatre composantes du système dans l'exploitation n'est perçue que par un tiers des agro-éleveurs et éleveurs. Aucun agriculteur ne fait le lien entre une augmentation de la production végétale et une augmentation de la production animale. Ces différences de perception, liées en grande partie à la place de l'animal dans le système de production de

chaque exploitation, vont jouer un rôle central dans les évolutions de l'intégration agriculture-élevage envisagées par chaque producteur.



**Figure 17 :** Connaissances des producteurs sur les liens entre l'augmentation de la quantité de fumure organique produite, l'augmentation de la production végétale au sein de l'exploitation, l'augmentation de la quantité de fourrage pour les animaux et l'augmentation de la production animale de l'exploitation

#### 4.2.2. Simulation et évaluation ex-ante de scénarios prospectifs

Le diagnostic initial des connaissances et pratiques réalisé chez les 18 producteurs montre des marges de progrès possibles dans l'intégration entre agriculture et élevage. Ces marges ont été explorées avec six des 18 producteurs en suivant la démarche exposée ci-dessus.

##### 4.2.2.1. Situation initiale de chaque exploitation ( $S_0$ )

Les caractéristiques initiales de chaque exploitation (scénario  $S_0$ ) sont présentées dans le tableau IX. Chez les agriculteurs, la capacité de stockage de la fumure organique sous forme d'ordure ménagère et/ou de fumier, de l'ordre de 800 et 1000 kg par hectare de maïs cultivé, ne permet pas d'apporter une fumure organique conforme à la dose de 2000 kg/ha/an recommandée par les structures de développement (figure 18.a). De 8 à 15 % seulement de la surface totale cultivée pourrait recevoir cette dose (figure 18.b). Ces exploitations rencontrent des problèmes de baisse de rendements des cultures depuis plus de 10 ans pour A1 et plus de 5 ans pour A2 (tableau VIII), se traduisant par une faible couverture des besoins céréaliers de la famille si l'année est défavorable et un revenu négatif (figures 20.c et 21.c). Le bilan fourrager de A2 est excédentaire quel que soit le type d'année climatique mais est déficitaire

chez A1 en années climatiques favorable et moyenne où seule la paille de maïs est utilisée. En effet, lorsque l'année climatique est défavorable, la proportion des fanes de niébé riches en azote, augmente dans les stocks fourragers du fait d'une diminution de la proportion des tiges de céréales, plus sensible à la baisse de la pluviométrie.

**Tableau IX** : Caractéristiques du scénario S<sub>0</sub> pour les six exploitations

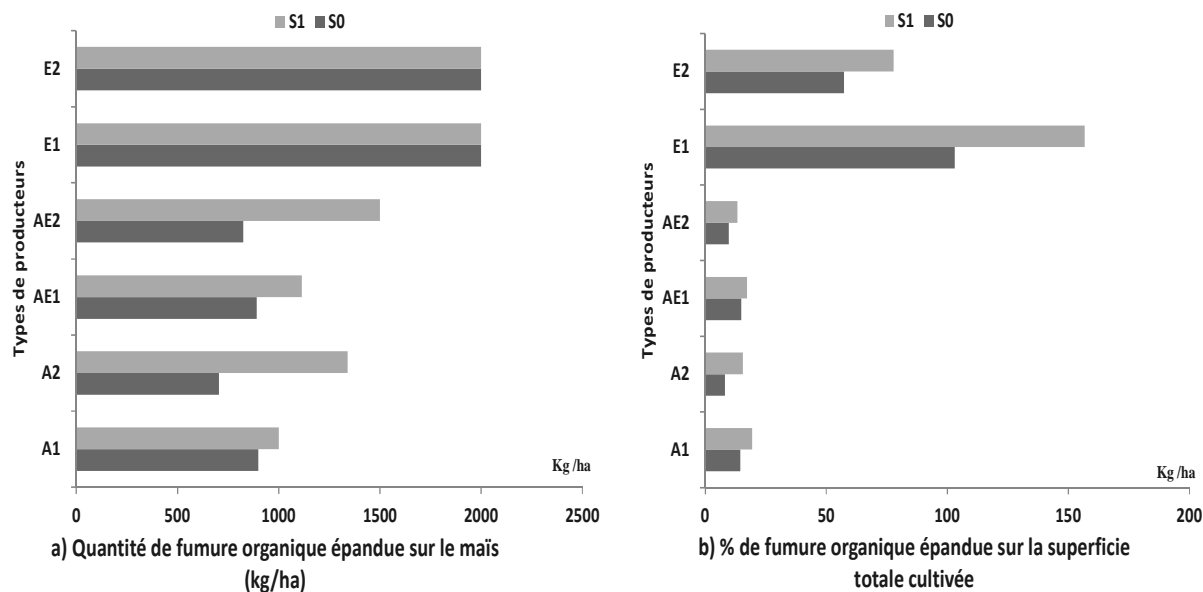
Variables	Exploitations						
	A1	A2	AE1	AE2	E1	E2	
Nombre d'actifs	8	4	45	11	5	4	
Capacité stockage fourrages (kg)	1500	450	2250	2250	1650	7800	
Capacité stockage FO (kg)	2000	1500	60000	3300	1500	4500	
Superficie de coton (ha)	0	0	25	7	0	0	
Superficie maïs (ha)	2,5	1,5	15	4	3	2,25	
Superficie sorgho (ha)	2,5	0,75	3	0,5	0	1	
Superficie niébé (ha)	1	0,25	0,5	0,5	0	0,25	
Superficie mucuna ( <i>Mucuna deeringiana</i> ) (ha)	0	0	0	0,5	0	0,25	
% résidus céréales (maïs, sorgho) récoltés	13	13	13	13	13	25	
% résidus légumineuses (niébé) récoltés	100	0	0	100	0	100	
Capacité stockage FO/ha maïs cultivé (kg/ha)	800	1000	4000	825	500	2000	
Nombre de Bœufs de Trait (BT)	2	2	7	6	4	2	
Nombre de Bœufs d'Élevage (BE)	0	0	15	2	25	25	
Nombre de Petits Ruminants (PR)	10	5	8	2	5	6	
Capacité stockage fourrage/ UBT (kg/UBT)	441	155	152	250	111	520	
Devenir déjections BT	SP/SSF/SSC	F/F/F	P/N/N	F/P/F	F/F/F	P/P/P	F/P/P
Devenir déjections BE	SP/SSF/SSC	N/N/N	N/N/N	P/P/F	F/F/F	N/P/P	F/P/P
Devenir déjections B emb	SP/SSF/SSC	N/N/N	N/N/N	N/N/N	N/N/N	N/N/N	N/N/F
Achat B emb	0	0	0	0	0	2	
Vente BE	0	0	0	0	2	2	
Vente PR	0	0	0	0	2	2	
Vente B emb	0	0	0	0	0	2	
Nombre de BT/BE/Bemb rationné en SSC	2/0/0	2/0/0	7/0/0	6/2/0	4/0/0	2/0/2	
Apport NPK sur maïs (kg)	100	100	100	100	50	0	
Apport Urée sur maïs (kg)	50	50	50	50	0	0	

**FO** : Fumure Organique ; **BT** : Bovin de Trait ; **BE** : Bovin d'Élevage ; **B emb** : Bovin d'Embouche ; **PR** : Petits Ruminants ; **SSC** : Saison Sèche Chaude ; **SP** : Saison Pluvieuse ; **SSF** : Saison Sèche Froide ; **SSC** : Saison Sèche Chaude ; **P** : Parc ; **F** : Fosse ; **N** : Néant.

**Texte en italique** : variables non prises en compte dans le modèle.

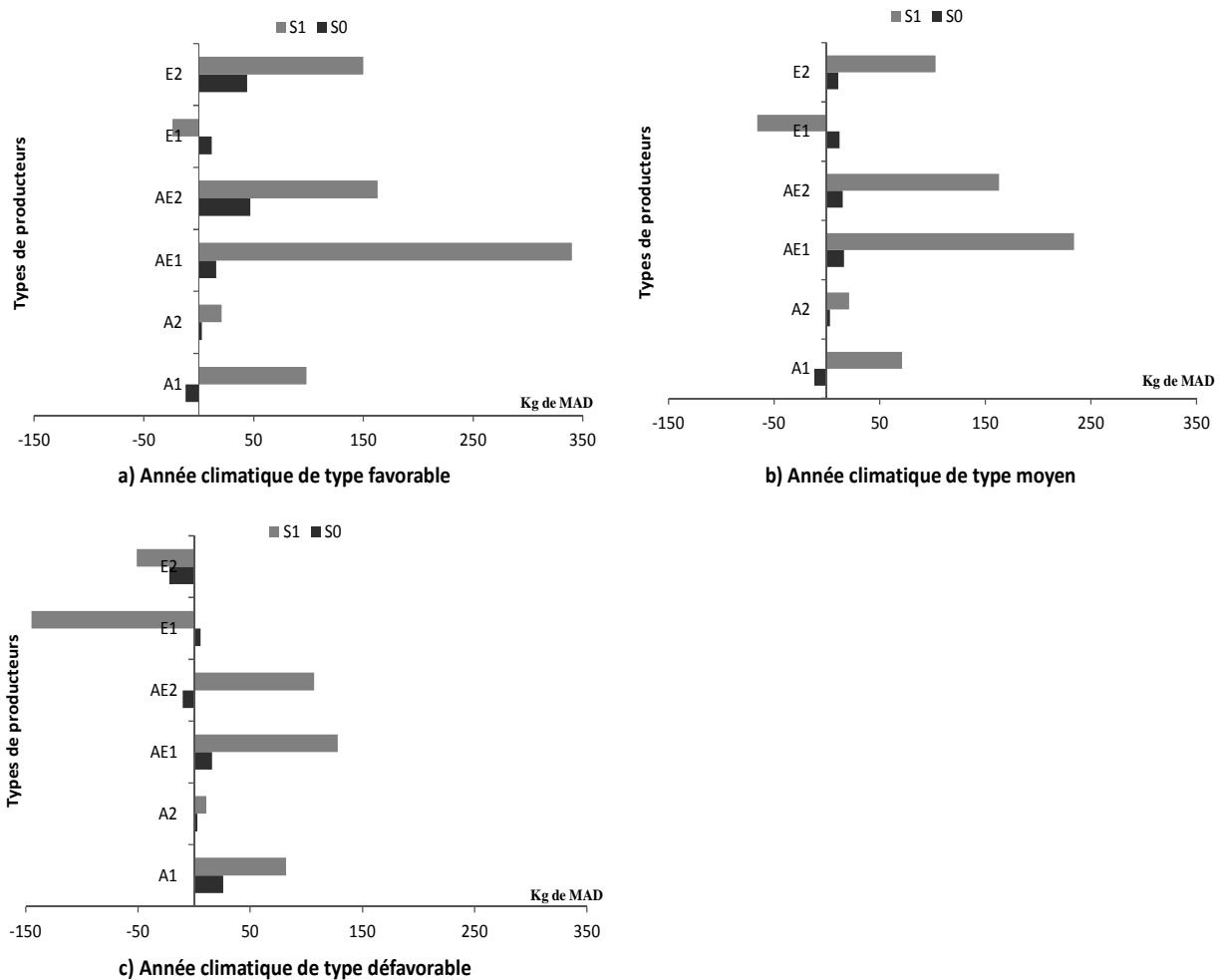
Chez les agro-éleveurs, AE1 a une grande capacité de stockage de la fumure organique (4000 kg de fumure organique par hectare de maïs cultivé) (tableau IX). Mais sa faible capacité de stockage du fourrage (152 kg/UBT) l'amène à n'alimenter que les bœufs de trait, ce qui limite les quantités de litière et de déjections animales recueillies et par conséquent, la production de fumure organique (figures 18.a et 18.b). Cela se traduit par une baisse de rendement des cultures et un déficit céréalier en cas d'année défavorable (figure 20.c). Le producteur AE2 rencontre également des problèmes de baisse de rendement des cultures depuis plus de 10 ans (tableau VIII) due aux faibles apports de la fumure organique (825 kg/ha sur maïs (tableau IX) liés davantage à sa faible capacité de stockage de la fumure se traduisant par un déficit céréalier et fourrager en cas d'année défavorable (figures 18.a et 20.c).





**Figure 18 :** Quantité de la fumure organique épandue sur le maïs et pourcentage de la fumure organique épandue sur toute la superficie cultivée par type de producteur avec les scénarios  $S_0/S_1$

Chez les éleveurs (E1 et E2), seule une faible partie de leur troupeau est alimentée en saison chaude à partir de leurs stocks fourragers. Ils sont donc fortement dépendants du disponible fourrager à l'échelle du village. Ils peuvent néanmoins produire suffisamment de fumure organique pour couvrir les besoins de leurs cultures compte tenu de leurs faibles surfaces (figure 18.a). E2 a mis en place un atelier d'embouche de 2 à 3 bovins depuis plus de 5 ans pour diversifier ses sources de revenu (tableau VIII). Cette activité a permis à E2 d'améliorer son revenu par actif comparativement à l'éleveur E1. La pratique de l'embouche bovine nécessite plus de stocks fourragers et malgré la grande capacité de stockage des résidus et la production de fourrages cultivés de E2, son bilan fourrager est déficitaire en année défavorable (figure 19.c).



**Figure 19** : Bilan fourrager en termes de kilogramme de Matière Azotée Digestible (MAD) par type de producteur en fonction de l'année climatique (favorable, moyenne, défavorable) avec les scénarios  $S_0/S_1$

#### 4.2.2.2. Co-construction des scénarios projets avec les producteurs ( $S_1$ )

Les scénarios projets co-construits avec les producteurs visent à répondre aux difficultés diagnostiquées à travers la simulation de  $S_0$ . Les agriculteurs et agro-éleveurs cherchent ainsi à augmenter la production de fumure organique. Cependant les pistes envisagées diffèrent d'un producteur à l'autre (tableaux X et XI). A1 compte passer par des achats extérieurs de fumure et une augmentation des quantités de fumure produites sur l'exploitation et stockées. Pour ce faire, le producteur envisage de construire une fosse fumièrre, d'augmenter les capacités de stockage de fourrage et de ramasser plus de pailles pour augmenter le temps de présence des animaux en stabulation et les effectifs de bœufs de trait qui permettront également d'améliorer les capacités de travail (tableau XI). A1 réalise ainsi une augmentation de 100% et 50% en termes respectivement de capacité de stockage de fourrage et de celle de

la fumure organique (tableau X). Egalement il a augmenté de 20% la superficie en maïs et abaissé de 40% celle du sorgho. A2 et AE1, qui disposent d'un nombre plus élevé d'animaux et des capacités de stockage de fumure par hectare de maïs supérieures, souhaitent essentiellement augmenter le temps de présence des animaux en stabulation en augmentant leurs capacités de stockage fourrager (tableau X). AE1 envisage en outre l'introduction de *Mucuna deeringiana* à la fois pour son rôle sur la fertilité du sol, et pour alimenter les animaux d'un nouvel atelier d'embouche (tableau XI). A surface cultivée égale, cela implique alors de diminuer sa surface en coton et de celle du maïs (tableau X). AE2 compte augmenter la production de fumure organique par la production de compost, le parage des animaux directement sur les parcelles. Il compte également augmenter la capacité de stockage de fourrage en combinaison avec la production de *Mucuna deeringiana* afin d'accroître son offre fourragère. On note ainsi une augmentation de 80% en termes de capacité de stockage du fourrage et de 36% pour celle de la fumure organique (tableau X). AE2 a diminué les superficies des cultures de coton et maïs respectivement de 21% et 25%.

Chez les éleveurs, les scénarios co-construits visent à augmenter les quantités de fourrages produites par UBT sur l'exploitation. Les pistes envisagées dans ces deux cas de figure sont identiques, à savoir la diminution des effectifs animaux pour diminuer la demande fourragère, l'augmentation des capacités de stockage de fourrage, l'introduction de cultures fourragères (*Mucuna deeringiana*) et de niébé chez le premier, l'augmentation des surfaces existantes de *Mucuna deeringiana* chez le second (tableaux X et XI). Nous avons noté chez E1 une augmentation de 355% en termes de capacité de stockage de fourrages (tableau X). Chez E2 cette augmentation de la capacité de stockage de fourrage est de 35% (tableau X).

Chez deux producteurs (AE1 et E1), les discussions ont conduit à lier ces changements préconisés avec l'introduction d'un atelier d'embouche pour diversifier les sources de revenu et valoriser les stocks fourragers (tableau XI).

Afin d'augmenter leur production agricole, tous les producteurs ont planifié une augmentation des doses d'apports de fumure minérale (NPK et Urée) sur le maïs (tableau XI). Ces apports sont de 150 kg/ha pour le NPK et de 100 kg/ha pour l'Urée (tableau X). Les rendements de cette culture ont été modifiés en conséquence dans les scénarios projet.

**Tableau X:** Variation des valeurs des entrées entre  $S_0$  et  $S_1$  pour les 6 exploitations

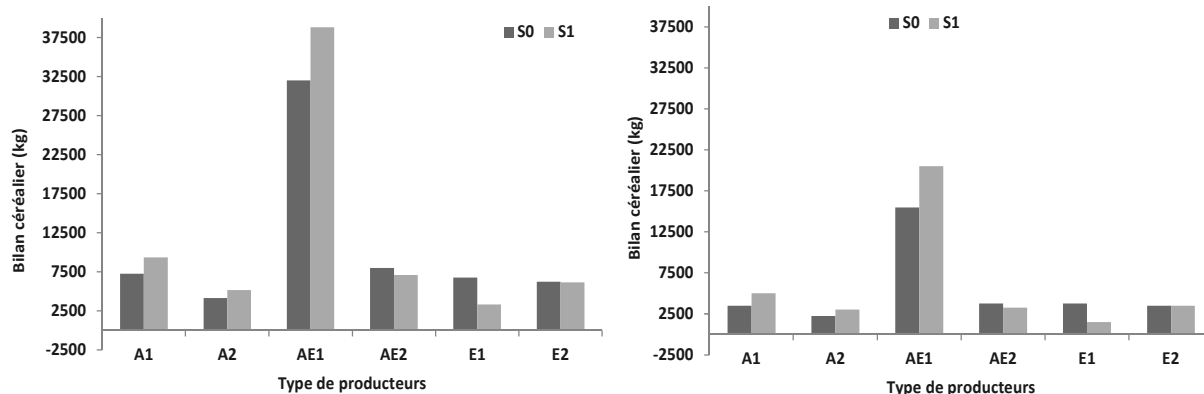
Variables	Exploitations					
	A1	A2	AE1	AE2	E1	E2
Capacité stockage fourrages (%)	+100	+567	+300	+80	+355	+35
Capacité stockage FO (%)	+50	+200	0	+36	0	0
Superficie de coton (%)	0	0	-32	-21	0	0
Superficie maïs (%)	+20	0	-7	-25	-50	-11
Superficie sorgho (%)	-40	0	0	0	0	-50
Superficie niébé (ha)	0	0	0	0	+0,75	+0,75
Superficie mucuna (ha)	+0,5	0	+2	+1	+0,75	+1,25
% résidus céréales (maïs, sorgho) récoltés	+25	+38	+13	+25	+25	+50
% résidus légumineuses (niébé) récoltés	+100	0	+100	+100	+100	+100
Capacité stockage FO/ha maïs cultivé (kg/ha)	+25	+200	+7,2	+82	+50	+13
Nombre de BE	0	0	15	2	22	20
Capacité stockage fourrage/ UBT (kg/UBT)	880	1049	246	450	328	553
Devenir déjections BT	SP/SSF/SSC	Id	Id	Id	Id	F/P/F
Devenir déjections BE	SP/SSF/SSC	Id	N/P/N	Id	Id	F/P/F
Devenir déjections B emb	SP/SSF/SSC	Id	Id	N/N/F	Id	N/N/P
Achat de petit ruminant	+4	0	0	0	0	0
Achat B emb	0	0	+3	0	0	0
Vente BE	0	0	0	0	+1	2
Vente PR	+4	+2	0	0	0	0
Vente B emb	0	0	+3	0	+2	0
Nombre de BT/BE/Bemb rationné en SSC	0/0/0	0/0/0	0/0/3	0/0/0	0/22/2	0/10/2
Apport NPK sur maïs (kg/ha)	150	150	150	150	150	150
Apport Urée sur maïs (kg/ha)	100	100	100	100	100	100

**FO** : fumure organique ; **BT** : bovin de trait ; **BE** : bovin d'élevage ; **B emb** : bovin d'embouche ; **SSC** : saison sèche chaude ; **SP** : saison pluvieuse ; **SSF** : saison sèche froide ; **SSC** : saison sèche chaude ; **P** : parc ; **F** : fosse ; **N** : néant ; **Id** : identique entre  $S_0$  et  $S_1$ .

#### 4.2.2.3. Effets du scénario projet sur l'intégration agriculture-élevage

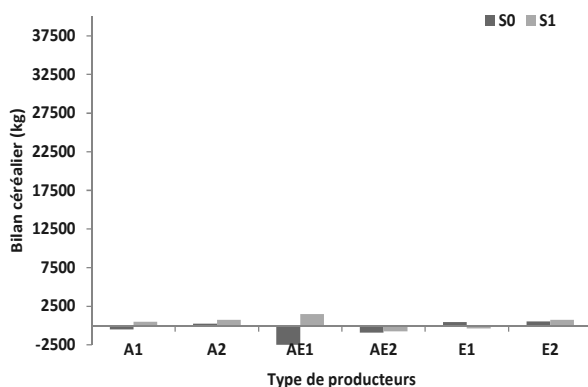
$S_1$  permet d'améliorer les bilans fourragers des agriculteurs et agro-éleveurs quelle que soit l'année climatique malgré l'introduction de l'embouche chez AE1 (Tableau X et figure 19). Ce résultat est lié à l'augmentation de la capacité de stockage du fourrage et des quantités stockées chez l'ensemble des producteurs ainsi que l'introduction de cultures fourragères (tableau X).

Le surplus fourrager et les refus permettent d'augmenter les apports de fumure par hectare de maïs pour les agriculteurs et agro-éleveurs, mais ces apports restent inférieurs aux recommandations des structures de vulgarisation (figure 18.a). Ces apports de fumure organique ne dépassent pas 20% de la surface totale cultivée à raison de 2 tonnes par hectare (figure 18.b). Ils permettent néanmoins d'améliorer les bilans céréaliers en année climatique défavorable (figure 20.c), excepté pour AE2 du fait de la diminution du quart de sa surface initiale en maïs (tableau X). Cette amélioration des bilans céréaliers est aussi liée à l'augmentation des apports de fumure minérale sur la culture du maïs (tableau X).



a) Année climatique de type favorable

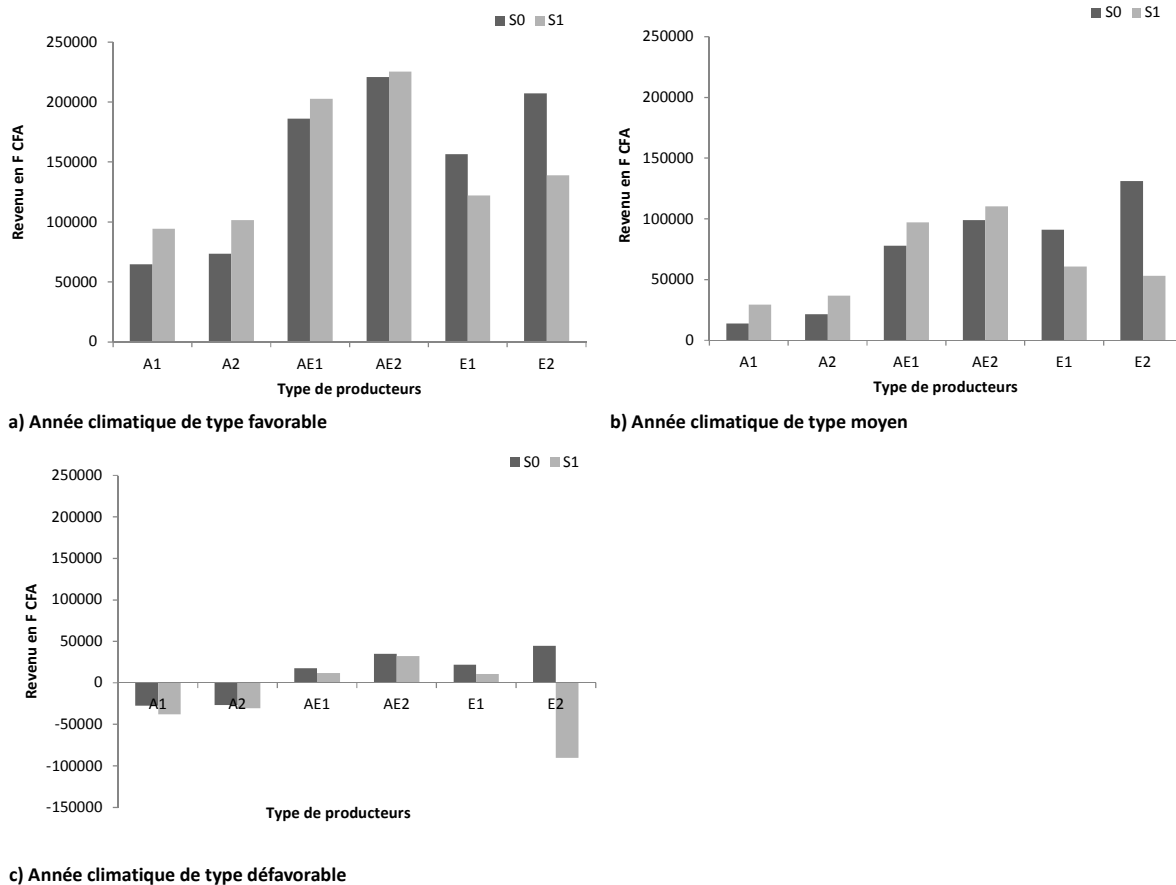
b) Année climatique de type moyen



c) Année climatique de type défavorable

**Figure 20 :** Bilan céréalier en termes de production de maïs et de sorgho grain (kg) par type de producteur en fonction de l'année climatique (favorable, moyenne, défavorable) avec les scénarios S0 /S1

Une amélioration des revenus des agriculteurs et agro-éleveurs est observée en années favorable et moyenne (figures 21.a et 21.b). Cette variation positive est due à la diversification des sources de revenu par l'introduction d'embouche ovine et bovine dans les exploitations et par l'augmentation de la production végétale permise par les apports de fumure organique et minérale. L'amélioration des bilans céréaliers constatée en année climatique défavorable demeure cependant insuffisante pour supporter l'ensemble des charges engendrées par les achats d'engrais minéraux entraînant ainsi une baisse des revenus (figure 21.c).



**Figure 21 :** Revenu moyen (en F CFA) par actif de chaque type de producteurs en fonction de l'année climatique (favorable, moyenne, défavorable) avec les scénarios S0 /S1

Chez E1, la sédentarisation du troupeau entraîne une augmentation des besoins en fourrages non compensés par l'augmentation des stocks et de la surface fourragère (figure 19). Cette situation conduit à un bilan fourrager négatif pour les trois types d'année simulée. La baisse des surfaces de céréales au profit de la culture fourragère (tableau X) se traduit par une diminution du bilan céréalier qui devient négatif en année défavorable. Cette baisse des bilans céréaliers et fourragers conduit à des revenus plus faibles (figures 20 et 21), le déficit fourrager conduisant à des achats de tourteaux de coton. Ce processus se retrouve chez E2 uniquement en année climatique défavorable.

#### 4.2.2.4. Evaluation par les producteurs des différents changements entre $S_0$ et $S_1$ et suivi des pratiques

Pour passer de  $S_0$  à  $S_1$ , les exploitants doivent mettre en œuvre certains changements dans l'exploitation. Ainsi, l'agriculteur A1 et les deux agro-éleveurs doivent mettre en œuvre des changements structurels par la construction de fosse à compost (A1), de fenil (AE1) et de parc

à bétail au champ (AE2) (Tableau XI). La mise en place de ces changements est jugée difficile par le producteur A1. Ces changements structurels sont moins difficiles pour les producteurs AE1 et AE2 qui ont des capacités d'investissement supérieures.

**Tableau XI** : Différentes stratégies d'intégration agriculture – élevage envisagées par les exploitants

Type changement	Modifications à conduire	Exploitations					
		A1	A2	AE1	AE2	E1	E2
Structurel	Achat de bœuf de trait	□					
	Construction de fosse à compost	□					
	Construction d'un fenil pour augmenter la capacité de stockage de la paille			□			
	Mise en place d'un parc à bétail au niveau du champ de brousse				□		
Stratégique	Augmentation de la capacité de stockage de fourrage	□	□	□	□	□	□
	Introduction d'une sole fourragère	□	□	□		□	
	Introduction d'une sole de légumineuse					□	
	Introduction d'un atelier d'embouche bovine			□		□	
	Réduction de l'effectif du troupeau					□	□
	Introduction de la jachère dans l'assolement				□		
Tactique	Augmentation du taux de remplissage de la fosse	□	□		□		
	Augmentation de la dose d'apport de fumure minérale sur le maïs	□	□	□	□	□	□
	Achat de fumier auprès des éleveurs	□	□	□			
	Réduction de la superficie en coton			□	□		
	Augmentation de la sole fourragère				□		□
	Apport de fumure minérale sur le maïs					□	□

**X** : Changement jugé difficile par le producteur

□ : Changement jugé facile par le producteur

Les changements d'ordres stratégiques et tactiques concernent les six producteurs qui ont tous prévu dans le court terme une augmentation des stocks de fourrage et une amélioration des taux de remplissage de leurs fosses. Ces changements en termes d'augmentation de la capacité de stockage de fourrage, de réduction de l'effectif du troupeau et de l'augmentation de la sole fourragère ont été jugés difficiles à mettre en œuvre par les deux éleveurs E1 et E2 (tableau XI). En effet, la mise en place de ces changements va constituer en une rupture avec leurs savoirs et pratiques de gestion du troupeau. Les changements d'ordres stratégiques et tactiques sont jugés plus faciles à mettre en œuvre chez les agriculteurs et agro-éleveurs. Quelques difficultés apparaissent néanmoins. Elles sont liées à la possibilité d'acquérir un crédit pour ceux désirant faire de l'embouche bovine (AE1) ou acheter du fumier (A1, A2,

AE1), à la mobilisation des membres actifs de l'exploitation autour de la collecte de fumure organique et du fourrage (A1, A2, AE1) ou pour la conduite de la sole fourragère.

Une mise en œuvre effective des changements d'ordre stratégique et tactique a été observée dès la première campagne agricole ayant suivi l'intervention chez les producteurs (situation à n+1, tableau XI). Ainsi, on note une augmentation réelle de la production de fumure organique chez 5 des 6 producteurs entre la situation initiale et la situation à n+1. A2 a introduit une culture fourragère dans son assolement et E2 a augmenté sa surface fourragère (tableau XI). En revanche, AE2 et AE1, ont respectivement diminué et supprimé la superficie en culture fourragère au profit du coton dont le prix d'achat au producteur a augmenté et le prix des intrants diminué (tableau XI). Une augmentation des doses d'apports de fumure minérale sur le maïs est également observée entre le scénario n et celui de n+1 chez tous les producteurs (tableau XI).

**Tableau XII : Scénario et pratiques réelles des producteurs**

Variables	Scénario	Exploitations					
		A1	A2	AE1	AE2	E1	E2
Stockage de fumure organique (kg)	n	2000	1500	60000	3300	1500	4500
	S <sub>1</sub>	3000	4500	60000	4500	1500	4500
	n+1	5250	15000	78300	3900	3750	4500
Superficie en coton (ha)	n	0	0	25	7	0	0
	S <sub>1</sub>	0	0	17	5,5	0	0
	n+1	4	0	26	9	0	0
Superficie en céréales (ha)	n	5	2,25	18	4,5	3	3,25
	S <sub>1</sub>	4,5	2,25	17	3,5	1,5	2,5
	n+1	3	3,25	17	4,5	1,5	3,4
Superficie en légumineuse (ha)	n	1	0,25	0,5	0,5	0	0,25
	S <sub>1</sub>	1	0,25	0,5	0,5	0,75	1
	n+1	0,5	0,5	0,5	0,25	0	0,25
Superficie en culture fourragère (ha)	n	0	0	0	0,5	0	0,25
	S <sub>1</sub>	0,5	0	2	1,5	0,75	2
	n+1	0	0,25	0	0,25	0	0,75
Dose d'apport de NPK sur le maïs (kg/ha)	n	100	100	100	100	50	0
	S <sub>1</sub>	150	150	150	150	150	150
	n+1	150	150	150	150	67	80
Dose d'apport d'Urée sur le maïs (kg/ha)	n	50	50	50	50	0	0
	S <sub>1</sub>	100	100	100	100	100	100
	n+1	50	50	50	50	67	60

**n** : situation initiale ; **S<sub>1</sub>** : scénario co-construit ; **n+1** : pratiques réellement observées



### 4.3. Discussion

L'intégration agriculture – élevage la plus pratiquée actuellement par les producteurs prend la forme d'un transfert de faibles quantités de biomasse végétale vers les animaux de trait utilisés pour les travaux champêtres. Ces bœufs de trait produisent en retour de faibles quantités de fumure animale utilisée pour la fertilisation des cultures. Cette pratique est courante depuis l'introduction de la traction animale dans les exploitations agricoles (Vall *et al.*, 2003) mais ne permet pas d'atteindre les deux tonnes à l'hectare sur les parcelles de maïs préconisées par la recherche (Traore *et al.*, 2007).

Face à la baisse de la production agricole constatée ces dernières années due à la quasi disparition de la jachère et à la saturation du foncier, deux stratégies se font jour conduisant aux mêmes pratiques de stockage de la biomasse produite et de stabulation des animaux sur l'exploitation pendant la saison sèche chaude. Les agriculteurs et les agro-éleveurs visent explicitement à produire de la fumure organique pour améliorer la fertilité de leurs sols, alors que les éleveurs, qui disposent d'une charge animale élevée par hectare cultivé, cherchent à mieux alimenter leur troupeau et à réduire leur mobilité, source de dépenses énergétiques et de conflits avec les autres types de producteurs.

Pour justifier un stockage accru de fourrage et rentabiliser l'effort consenti pour collecter plus de biomasse, les projets formulés par les producteurs doivent inclure des activités génératrices de revenu pour l'exploitation telles que l'embouche ovine et bovine (Okike *et al.*, 2005 ; Basu et Scholten, 2012). Cette tendance se retrouve bien dans les projets des agriculteurs et agro-éleveurs étudiés, qui leur permettent en général d'améliorer leur bilan céréalier tout type d'année confondu et leur revenu par actif en années climatiques favorable et moyenne. En année climatique défavorable, le surplus céréalier ne compense pas l'achat d'engrais entraînant ainsi une baisse du revenu par actif et rendant le système plus vulnérable.

En outre les importants changements d'ordres structurels, stratégiques ou tactiques envisagés ne permettent pas d'augmenter significativement la part de la surface cultivée fertilisée organiquement selon les préconisations des structures de vulgarisation. Cette insuffisance de matières organiques peut influencer la durabilité de ces exploitations. De plus les difficultés perçues par les agriculteurs et agro-éleveurs pour mettre en œuvre ces changements interrogent la faisabilité de l'intégration agriculture-élevage dans leurs exploitations (van Wijk *et al.*, 2009 ; Franke *et al.*, 2010). Nos résultats montrent donc les limites de cette voie dans un contexte où l'élevage demeure une activité économique encore peu développée en

l'absence de filières organisées, notamment pour l'embouche ou la production laitière. Les stratégies testées combinent usage de fumure organique et d'engrais minéraux à des doses relativement faibles. L'augmentation des apports d'engrais minéraux offre des perspectives pour améliorer la productivité de ces systèmes intégrés mais avec le risque d'augmenter leur vulnérabilité.

Chez les éleveurs, l'amélioration de l'alimentation fourragère du troupeau et la réduction de la mobilité nécessitent une réduction des effectifs et une augmentation des quantités de fourrages produites et stockées. Ces évolutions sont en contradiction avec leurs pratiques existantes et leur conception traditionnelle de l'élevage, basée sur l'accumulation d'animaux pour le prestige social et la mobilité pour pallier l'insuffisance, l'hétérogénéité et la dispersion des ressources fourragères et de l'eau d'abreuvement (Mohamed Saleem, 1998 ; Okike *et al.*, 2005). Elles sont en accord avec leur perception grandissante mais ne peuvent perdurer. Avec l'augmentation de la population dans les zones d'accueil des troupeaux et les contraintes familiales liées à la scolarisation des enfants, les pistes envisagées par les éleveurs nécessitent non seulement des changements de pratiques dans la gestion du troupeau mais aussi des changements de représentations sociales sur leur métier et sur leur propre identité. La disparition de la mobilité du troupeau pourrait en outre avoir des implications sur les autres types de producteurs et l'ensemble des flux de biomasse à l'échelle du territoire villageois. En effet, la mobilité favorise les échanges entre producteurs pour la vente d'animaux, de lait et les contrats de fumure organique (Smaling et Dixon, 2006).

#### **4.4. Conclusion partielle**

Basée sur une interaction entre chercheurs et producteurs, cette étude a permis d'identifier des scénarios d'augmentation des quantités de biomasses animale et végétale transférables dans les systèmes de production mixtes agriculture – élevage afin d'améliorer leur production. Les exploitations à forte composante agricole (agriculteurs et agro-éleveurs) se sont orientées vers des scénarios permettant une augmentation de la production végétale par l'augmentation et la valorisation de la biomasse animale produite en interne, voire achetée. Les éleveurs ont imaginé des projets allant dans le sens d'une réduction de la taille de leur troupeau et d'une introduction de cultures fourragères dans l'assolement, en articulation avec une augmentation de la capacité de stockage de la paille.

Ces scénarios permettent d'améliorer les bilans céréaliers, fourragers et économiques de certains producteurs. Néanmoins l'augmentation de la quantité d'apport de fumure organique à l'hectare chez les agriculteurs et agro-éleveurs reste trop faible pour espérer améliorer durablement la production végétale. Or ces scénarios nécessitent des changements structurels, stratégiques et tactiques qui mobiliseraient d'importants moyens financiers pour certains agriculteurs et agro-éleveurs, et une modification des modes de conduite du troupeau pour les éleveurs. L'intégration agriculture-élevage dans ce contexte présente donc des limites qui freinent la productivité agropastorale des exploitations à long terme.

Le modèle « Cikada » de simulation a permis une analyse des résultats des scénarios stratégiques co-conçus avec les producteurs pour une meilleure intégration de l'agriculture à l'élevage. Dans la suite de cette étude, nous allons utiliser la même démarche pour évaluer trois modèles ayant des principes de modélisation différents dans l'accompagnement des exploitations agricoles à la planification de leur campagne agricole.

## **Chapitre 5 : Evaluation de trois applications en situation d'aide à la planification des producteurs**

Les modèles à l'échelle de l'exploitation décrits dans la littérature utilisent les trois grands modes de représentation de l'exploitation agricole décrits dans le premier chapitre : (i) les modèles de simulation sans modélisation des règles de décision du producteur, (ii) les modèles d'optimisation maximisant le revenu sous contraintes, et (iii) les modèles simulant de manière pluriannuelle les règles de décision du producteur. Cette étude vise à préciser le lien entre conception et usages de modèles de simulation relevant des trois familles ci-dessus, dans une démarche d'accompagnement à la planification de la campagne agricole impliquant des chercheurs et des producteurs pris individuellement.

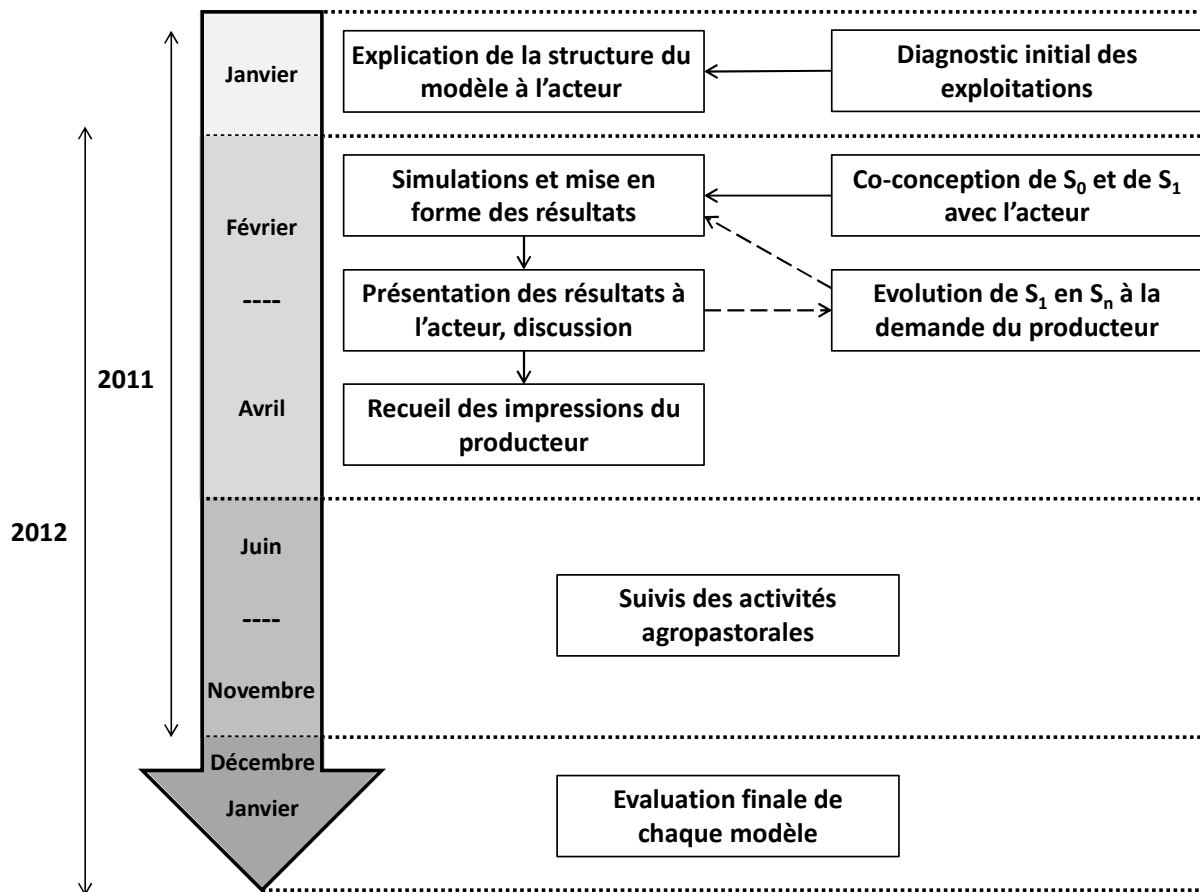
### **5.1. Méthodologie**

#### **5.1.1. Exploitations et modèles utilisés**

L'étude a été menée dans les villages de Koumbia et Waly (Ouest du Burkina Faso) et a concerné les 18 exploitations décrites au niveau du chapitre 2. Elle s'est basée sur l'utilisation conjointe des trois outils développés dans cette zone : « *Optimcikèda* », pour l'optimisation des ressources de l'exploitation, « *Cikèda* », pour la simulation des performances technico-économiques annuelles de l'exploitation et « *Simflex* », pour la simulation pluriannuelle des règles de décisions du producteur.

#### **5.1.2. Démarche utilisée**

La démarche utilisée s'est fondée sur les principes suivants : (i) accompagnement individuel par le chercheur de chaque producteur retenu ; (ii) utilisation d'un seul outil par producteur ; (iii) diagnostic initial suivi d'une alternance de phases de planification et de suivi de la campagne agricole sur deux ans (2011 et 2012) ; (iv) clôture par une phase d'évaluation (Figure 22). L'étape initiale de diagnostic a permis d'identifier les différents problèmes que rencontrent les producteurs dans la gestion de la production agropastorale et d'évaluer leurs connaissances initiales sur les systèmes de culture et d'élevage et sur l'estimation de leurs résultats économiques. Au cours de cette phase, la structure du modèle utilisé ainsi que ses principes de modélisation ont été présentés à chaque producteur.



$S_0$  : Scénario de la campagne agricole passée du producteur (situation initiale)

$S_1$  : Scénario de la campagne à venir

$S_n$  : Evolution visant à améliorer le scénario ( $S_1$ ) de la campagne agricole à venir

**Figure 22** : Etapes de la démarche suivie pour l'évaluation des trois modèles

L'étape suivante a été consacrée à la co-conception des scénarios  $S_0$  et  $S_1$  correspondant respectivement à la campagne agricole passée du producteur et à la planification des activités de la campagne agricole à venir. Ces deux scénarios ont nécessité la collecte des données spécifiques à chaque outil (Tableau XIII), en sus des données structurelles de chaque exploitation. Certaines variables non comprises par les producteurs étaient estimées ou comparées à d'autres variables plus familières avant d'être extrapolées au niveau des outils. Ainsi, les producteurs n'évaluent pas le nombre d'actifs extérieurs employés par l'exploitation pour les travaux agricoles, variable d'entrée de Cikèda et d'Optimcikèda, mais plutôt le coût monétaire des activités d'entraide ou de la main d'œuvre extérieure par activité agricole. Ce coût est alors converti en nombre d'actifs extérieurs au niveau des modèles. Les résultats des simulations ont été présentés aux producteurs sous forme graphique afin de faciliter leur compréhension. Après discussion, de nouveaux scénarios de planification ont été construits par itération ( $S_2$  à  $S_n$ ), en fonction des résultats du scénario précédent et des objectifs de production du producteur. A l'issue de la discussion, chaque producteur a été appelé à

expliciter sa perception sur l’outil à l’aide d’un guide d’entretien. Puis les activités agricoles ont été suivies au cours de la campagne agricole suivante afin de mesurer les écarts entre les scénarios discutés et les décisions effectivement prises.

**Tableau XIII:** Nature des données complémentaires collectées pour chaque outil de simulation

Modèles	Entrées spécifiques
Cikèda	<ul style="list-style-type: none"> <li>- doses/ha d’herbicides, d’insecticides, NPK, Urée</li> <li>- achats de semences des différentes cultures ;</li> <li>- achat de matériels agricoles</li> <li>- achats et ventes par lot d’animaux / saison</li> <li>- nombre d’animaux par lot recevant un complément alimentaire durant la saison sèche chaude</li> </ul>
Simflex	<ul style="list-style-type: none"> <li>- règles déterminant : l’assolement coton/ céréales ; les achats d’engrais minéraux ; l’achat de tourteau de coton ; le départ en transhumance</li> <li>- séries virtuelles sur 10 ans : pluviométrie (favorable/ défavorable) ; prix de vente du kg de coton et de maïs ; prix d’achat d’un bœuf d’élevage et d’un bœuf d’embouche ; - prix de vente d’un bœuf d’élevage, d’un bœuf d’embouche, d’un litre de lait ; prix d’achat d’un sac d’engrais minéral et d’un kg de tourteau de coton</li> </ul>
Optimcikèda	<ul style="list-style-type: none"> <li>- charges dues aux achats de semences, d’engrais minéraux, d’herbicides d’insecticides,</li> <li>- charges dues aux services vétérinaires, achats de sel, tourteau de coton,</li> <li>- charges liées à la main d’œuvre salariée ou temporaire</li> </ul>

**Séries virtuelles :** Données imaginaires construites en fonction du contexte agropastoral.

La dernière phase a été consacrée à l’évaluation finale de la démarche et des modèles, à l’issue des deux années de travail avec les producteurs. Nous nous sommes inspirés des méthodes d’évaluation multicritère (Bohanec et Rajkovič, 1999) pour construire une grille d’évaluation et de comparaison des trois modèles et nous l’avons mise en œuvre avec chaque producteur. Cette grille comprend trois grands critères, à savoir la validation par les producteurs, la facilitation des apprentissages du producteur et la facilitation des apprentissages du chercheur afin de prendre en compte les attentes des différents acteurs dans l’accompagnement à la conception de nouvelles stratégies de production agropastorale (Aubert *et al.*, 2010). Chaque critère a été subdivisé en sous-critères auxquels sont associés des indicateurs d’évaluation (Tableau XIV).

**Tableau XIV:** Grille d'évaluation appliquée à chaque producteur et outil de simulation

Critère	Sous-critère	Indicateur	Evaluateur	Notation
Evaluation par le producteur	Domaine de validité	- planification assolement de la campagne agricole à venir, - gestion production de fumure/ fertilisation, - gestion affouragement des lots d'animaux en SSC ; - planification d'embouche bovine ; - Influence environnement climatique/ économique sur la production agricole.	Producteur	Oui ou non
	Perception du producteur sur le réalisme de l'outil	Réalisme des sorties relatives aux 5 indicateurs ci-dessus	Producteur	Oui ou non
Facilitation des apprentissages des producteurs	Acquisition de connaissances par le producteur	Evolution des connaissances entre le début et la fin de l'étude relative aux 4 indicateurs : - planification de l'assolement, de la campagne agricole à venir - gestion production de fumure et fertilisation, - gestion affouragement des lots d'animaux en SSC, - calcul du revenu Confrontation avec les pratiques des producteurs	Producteur	Elevé ou faible
Facilitation des apprentissages des chercheurs	Acquisition de connaissance par le chercheur	Connaissances nouvelles générées sur le fonctionnement de l'exploitation	Chercheur	Auto-évaluation

SSC : Saison Sèche Chaude

### 5.1.3. Analyse des données et présentation des résultats

Les différentes préoccupations des producteurs et pistes d'améliorations (thèmes) ont été listées en fonction de chaque type de producteurs et consignées dans un tableau au niveau de la première section des résultats de ce chapitre.

Les données de jugement des producteurs concernant le domaine de validité de chaque modèle ainsi que le niveau de pertinence des résultats ont été enregistrées sur une feuille du logiciel MS/EXCEL. Ces données ont été présentées sous forme d'histogrammes/ barres et commentées au niveau de la deuxième section des résultats.

Le nombre de producteurs par type ayant amélioré leurs connaissances sur les différents thèmes traités a été consigné dans un tableau au niveau de la troisième section des résultats. Ces données ont été commentées avec celles des pratiques de stockage de fumure organique/ fourrage des producteurs. Pour ce faire, nous avons évalué le pourcentage de variation entre

les pratiques initiales de stockage de fourrage et de fumure organique des producteurs et celles finales i.e après les deux années de l'étude. Cette évaluation a concerné :

- *le pourcentage de variation des stocks de fourrage = (stock final de fourrage – stock initial de fourrage)\*100/Stock initial de fourrage*
- *le pourcentage de variation des stocks de fumure organique = (stock final de fumure organique – stock initial de fumure organique)\*100/Stock initial de fumure organique*

Les données concernant les pourcentages de variation ont été représentées sous forme d'histogrammes/ barres.

Afin d'évaluer la pertinence des 3 modèles dans l'accompagnement à la conception de systèmes de production agropastoraux innovants, la grille d'analyse multicritères que nous avons élaboré (Tableau XIV) a été implémentée dans un logiciel Dexi (Bohanec et Rajkovic, 1999) d'évaluation multicritère. Dexi est un programme informatique destiné à la prise de décision multicritère. Il vise une évaluation de certaines options jugées souvent complexes. C'est un outil d'évaluation multicritère ayant une structure hiérarchique qui représente la décomposition du problème de décision en sous critères, qui sont plus petits, moins complexes et peut-être plus faciles à résoudre que le problème complet. Il nous a permis de générer des radars (à 3 sommets) par modèle en fonction des jugements des producteurs par critère d'évaluation. Ainsi, lorsque le critère est jugé élevé par les producteurs, une courbe relie le sommet de ce critère à un autre critère en fonction de son jugement. Lorsque le critère est jugé faible par les producteurs alors la courbe relie le point central du radar à un autre critère en fonction de son jugement.

## **5.2. Résultats**

### **5.2.1. Scénario fonction des types d'exploitation**

Les scénarios simulés avec chaque producteur ont varié en fonction de leurs préoccupations, elles-mêmes fonction de leurs types de rattachement (Tableau XV). Si l'adaptation des assolements à l'aléa pluviométrique est une préoccupation commune à tous, l'ajustement de la sole de coton au contexte économique et la gestion de la fertilité du sol ne concernent que les agriculteurs et agro-éleveurs. L'alimentation des animaux concerne les agro-éleveurs et les éleveurs. Mais certaines convergences sont apparues en cours de processus d'accompagnement, autour notamment de l'introduction de cultures fourragères et de



l'utilisation des résidus de culture en lien avec le développement d'ateliers d'embouche ovine et bovine.

**Tableau XV:** Préoccupations des producteurs et thèmes proposés par les producteurs

Préoccupations et Thèmes	Type de producteurs		
	Agriculteur (A)	Agro-éleveur (AE)	Éleveur (E)
<b>Préoccupations des producteurs</b>			
Adaptation de l'assolement à l'aléa pluviométrique	x	x	x
Adaptation de la sole de coton au prix du coton et des intrants	x	x	
Gestion de la fertilité des sols	x	x	
Alimentation du troupeau		x	x
<b>Thèmes pris en compte dans les scénarios simulés</b>			
Planification de l'assolement en fonction du contexte économique et climatique (arbitrage entre coton et céréales)	x	x	
Modification de la sole céréalière		x	x
Modification de la sole fourragère	x	x	x
Augmentation des apports de fumure organique	x		
Augmentation des apports de fumure minérale			x

x : Préoccupation ou thème pris en compte

### 5.2.2. Evaluation des outils par les producteurs

Bien que les trois outils considérés aient été conçus pour représenter une même entité, à savoir une exploitation de polyculture-élevage de l'ouest-Burkina, leur utilisation s'avère diversement adaptée aux différents thèmes traités lors du processus de planification des activités agropastorales (Figure 23). Tous les producteurs jugent que la planification de l'assolement et l'influence des conditions climatiques et économiques sont bien prises en compte par les outils qui leur sont proposés (figure 23). Mais seul Cikèda paraît fournir des résultats pertinents par rapport à ces deux thèmes. En effet, les résultats de cet outil ressemblent le plus souvent aux pratiques des producteurs. Les avis concernant les deux autres outils sont partagés. Les producteurs qui ont utilisé Simflex ont du mal à évaluer le réalisme des sorties présentées sur 10 années virtuelles car ils se projettent difficilement au-delà de la prochaine campagne. Ils considèrent en effet chaque année de la projection comme un scénario possible de la campagne agricole à venir, et non pas comme une année au sein d'une succession. La logique même de Simflex, consistant à analyser les risques pris sur le long terme, n'est donc pas bien comprise. Chez deux des six producteurs ayant utilisé Optimcikèda, le décalage entre l'assolement qu'ils planifient et la solution fournie par l'outil les a rendus dubitatifs sur le réalisme des sorties. De fait, Optimcikèda suit un raisonnement purement économique alors que le processus de planification réel des producteurs intègre

d'autres éléments tels que la possibilité d'acquiescer des intrants agricoles à crédit auprès de la société cotonnière pour les épandre sur le maïs.

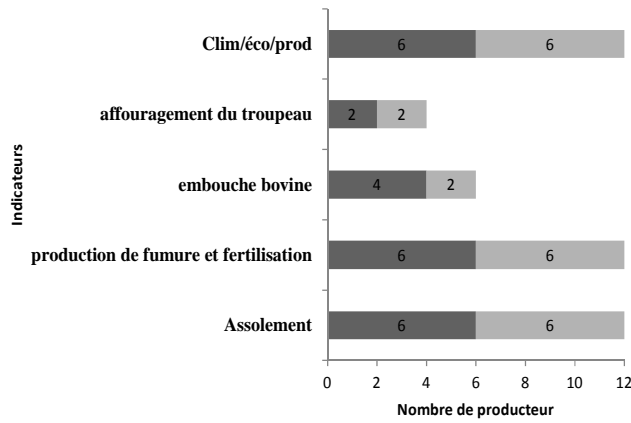
Les perceptions des producteurs sur les trois autres thèmes sont contrastées d'un outil à l'autre. La production de fumure organique et la fertilisation sont représentées de façon pertinente pour tous les producteurs avec qui Cikeda a été utilisé, pas du tout par Optimcikeda, Simflex occupant une position intermédiaire (figure 23). Ces différences s'expliquent par les modes de représentation de ces processus, qui influent sur la nature des scénarios pouvant être simulés. Cikeda permet aux producteurs de rentrer directement leurs apports d'engrais minéraux ou leurs pratiques de collecte des déjections animales ou de résidus de culture. Cela leur permet d'apprécier leurs effets sur les productions réelles et potentielles de fumure organique et les doses d'apport de fumure organique par culture. La production réelle est en effet estimée à partir des pratiques saisies en entrée (i) de collecte des déjections des lots d'animaux et (ii) de production de fumier à partir des ordures ménagères et des refus des stocks de résidus de cultures par les animaux. Cette quantité est limitée par la capacité de stockage de la fumure organique de l'exploitation déclarée en entrée et épandue prioritairement sur le maïs, puis sur le coton et le sorgho à raison de 2 000 kg par hectare et par an. A contrario, les deux autres outils traitent ce thème de manière très simplifiée. Simflex ne considère que la production potentielle de fumure organique issue d'une estimation de la quantité de déjections pouvant être produite durant les saisons sèches froide et chaude par les différents lots d'animaux stabulés. Optimcikeda optimise la sole maïs sur laquelle est épandue prioritairement la fumure organique, en fonction des effectifs d'animaux et des stocks de fumure organique mentionnés en entrée.

Les trois outils sont considérés comme aptes à planifier un atelier d'embouche bovine, mais avec une pertinence faible à nulle des résultats dans les trois cas (figure 23). Les agro-éleveurs considèrent que cette activité est bien simulée avec Cikeda car elle leur permet d'apprécier les besoins de l'atelier en termes de résidus et de complément alimentaire. Par contre, les éleveurs n'ont pas jugé les résultats adaptés à leurs besoins, car l'outil considère par défaut que les animaux d'embouche sont achetés maigres puis engraisés (pratique dominante dans la zone). Or, ils sélectionnent en général dans leurs troupeaux les animaux qu'ils souhaitent vendre pour la viande. Aucun producteur n'a jugé pertinentes les sorties de Simflex et Optimcikeda sur ce thème. Simflex utilise les mêmes entrées que Cikeda mais le calcul des achats de compléments alimentaires est basé sur un prix plafond donné par le producteur. Cette règle ne permet pas de voir l'impact réel de l'embouche sur ces achats. Dans

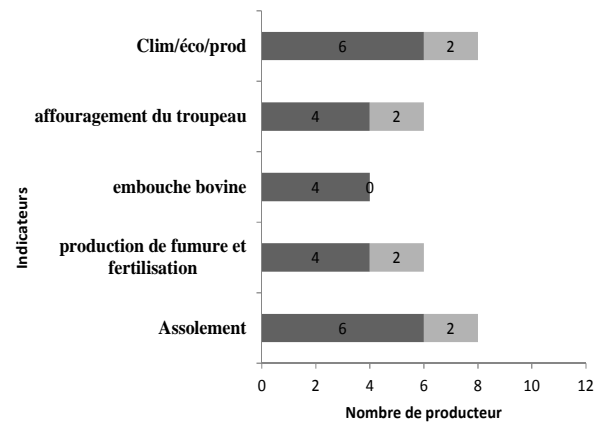
Optimcikēda, le nombre d'animaux à emboucher est une sortie fonction des résidus culturaux (sortie du modèle) dont dispose le producteur.

Enfin l'affouragement des bovins d'élevage ne paraît bien pris en compte que chez les agro-éleveurs et éleveurs ayant utilisé Simflex (figure 23). En effet Simflex simule un nombre de jours de transhumance pour les lots d'animaux lorsque le bilan fourrager calculé en fonction des résidus de culture produits/ stockés dans l'exploitation et les besoins fourragers du troupeau, est négatif et que le prix des compléments alimentaires dépasse le seuil d'achat des producteurs. Cette sortie, inexistante dans Cikēda et Optimcikēda, correspond à une pratique très courante chez les éleveurs. Ceci étant, le réalisme de cette sortie a été jugée faible car le départ en transhumance est aussi fonction des ressources fourragères et d'eau disponibles dans la zone durant la saison sèche chaude.

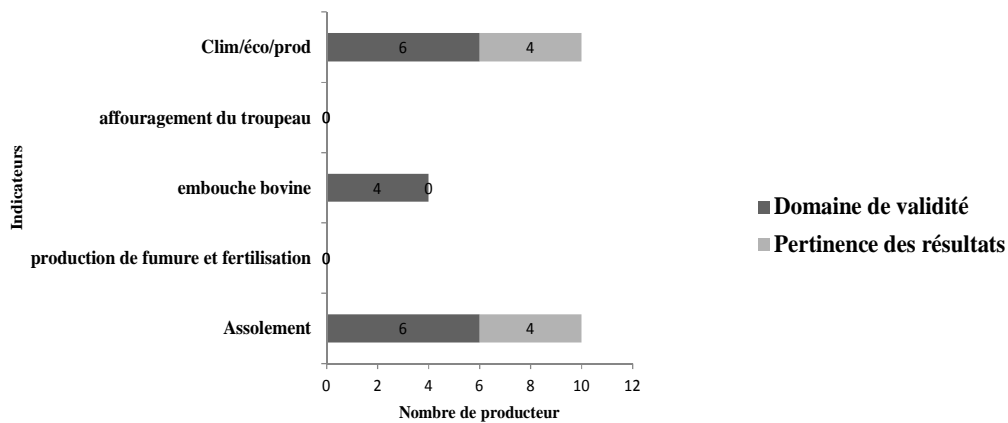
Globalement les sorties de Cikēda sont donc jugées plus pertinentes par les producteurs que celles des deux autres outils (figure 23). En effet, Cikēda permet de représenter de façon plus flexible leurs pratiques agropastorales en limitant le nombre d'hypothèses sur les processus représentés. Le caractère pluriannuel des simulations réalisées avec Simflex est difficilement compris par les producteurs dont l'horizon de raisonnement ne dépasse pas la campagne future, avec des règles qui s'ajustent et évoluent en fonction des observations et résultats de la campagne précédente. Enfin, la rationalité purement économique qui sous-tend Optimcikēda et la configuration de la matrice utilisée n'ont pas été validées par les producteurs. En effet, il n'inclut pas suffisamment d'éléments entrant dans leurs prises de décision, comme les échanges et location de terre cultivable. Néanmoins, son utilisation a permis aux producteurs de comparer leurs assolements planifiés avec l'optimum économique calculé sur leur propre exploitation. Trois des 6 producteurs ayant utilisé le modèle se sont trouvés confortés dans leur choix lorsque la différence entre assolements optimal et planifié était faible.



a) Producteurs avec cikeda



b) Producteurs avec Simflex



c) Producteurs avec Optimikeda

**Clim/éco/prod** : croisement environnement climatique/économique et production agricole

**Figure 23** : Nombre de producteurs par thème ayant validé le réalisme des sorties du modèle et/ou trouvé pertinent les thèmes traités en fonction de chaque modèle

### 5.2.3. Facilitation des apprentissages des producteurs

La majorité des producteurs, tous outils confondus, déclarent avoir amélioré leurs connaissances et pratiques dans le cadre de la démarche d'accompagnement, Cikeda se distinguant par une proportion plus importante de producteurs impactés (tableau XVI). Néanmoins des différences apparaissent concernant le type de connaissances et de pratiques générées par chaque outil.

#### 5.2.3.1. Gestion de l'affouragement des animaux

A l'exception d'un éleveur déjà conscient du problème, Cikeda a permis d'améliorer les connaissances des producteurs sur la gestion de l'affouragement des différents lots d'animaux. Ceci a concerné particulièrement l'évaluation des quantités de résidus à récolter pour répondre aux besoins des animaux et limiter leur dépendance au tourteau de coton. Cette meilleure compréhension des équilibres à trouver entre besoins des animaux et offre

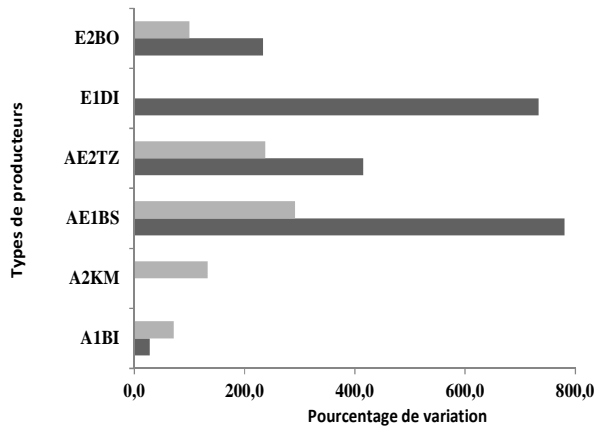
alimentaire s'est traduite concrètement chez les agro-éleveurs et les éleveurs par une augmentation de 28 à plus de 700 % des stocks de résidus de cultures dans l'exploitation (figure 24.a). Cette évolution s'est accompagnée chez deux producteurs par l'introduction d'une culture fourragère au sein de leur assolement, et chez un producteur par le lancement d'un atelier d'embouche bovine (tableau XVII). Les autres producteurs n'ont pas initié d'atelier d'embouche bovine compte tenu des coûts d'achats de bovins, de tourteau de coton et de contraintes d'organisation de l'exploitation liées à la planification de stockage de résidus et de suivi des animaux à emboucher.

Sur ce même thème, l'utilisation de Simflex n'a fait progresser les connaissances que des deux agro-éleveurs et d'un éleveur, qui se sont intéressés aux modes de calcul des besoins fourragers et des conséquences d'un déséquilibre sur la durée de la transhumance. L'augmentation des stocks de résidus récoltés est nettement moins marquée que dans le cas précédent, de 34 à 150 % par rapport à la situation initiale chez cinq des six producteurs (figure 24.b). Aucun d'eux n'a initié une production de culture fourragère ou un atelier d'embouche (tableau XVII), mais ce résultat peut provenir d'un biais d'échantillonnage car un agro-éleveur et un éleveur cultivaient déjà des fourrages, alors qu'un éleveur pratiquait depuis longtemps l'embouche bovine au sein de son exploitation. Pour ces derniers, l'utilisation de l'outil n'a rien apporté de neuf, comme le confirme le Tableau XVI.

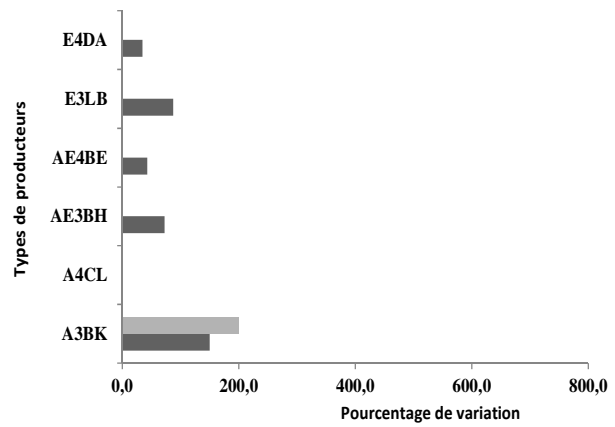
**Tableau XVI:** Nombre de producteurs déclarant avoir accru leurs connaissances par thème en lien avec l'utilisation d'un des trois outils

Thèmes	Outils		
	Optimcikèda	Cikèda	Simflex
Gestion de la fertilité du sol	2	4	3
Planification des activités	4	4	4
Alimentation des lots d'animaux	0	5	3
Calculs économiques liés aux activités agricoles	4	2	1

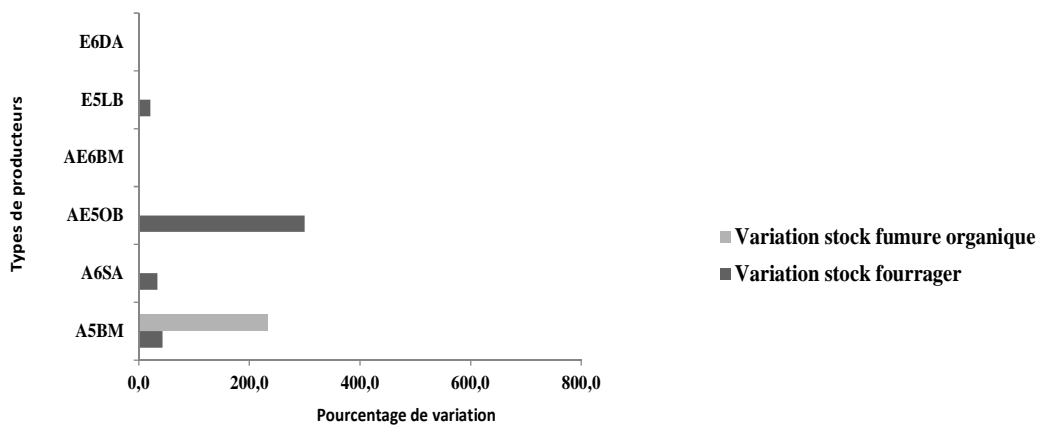
Sans surprise, l'utilisation d'Optimcikèda n'a généré aucune connaissance nouvelle sur ce thème (tableau XVI), dont la représentation dans la matrice de calcul se limite à évaluer le nombre optimal de bovins d'embouche en fonction des résidus de culture disponibles. Pratiquement, aucun producteur n'a introduit de culture fourragère ou d'atelier d'embouche bovine dans son exploitation, mais une amélioration des stocks fourragers est observée chez 4 producteurs (figure 24.c). Comme dans le cas précédent ces résultats sont fortement liés au contexte spécifique de chaque exploitation, dont dérivent les besoins de connaissance et de changement de pratiques.



a) Pratiques stocks fourrager et fumure organique des producteurs avec Cikeda (%)



b) Pratiques stocks fourrager et fumure organique des producteurs avec Simflex (%)



c) Pratiques stocks fourrager et fumure organique des producteurs avec Optimcikeda (%)

**Figure 24 :** Pourcentage de variation des stocks de fourrage et de fumure organique par type de producteurs en fonction du modèle entre la situation initiale et la situation finale de chaque exploitation

### 5.2.3.2. Gestion de la fumure organique et de la fertilité du sol

Quel que soit l'outil, les éleveurs n'ont pas acquis de connaissances sur ce thème. En effet, la production de fumure ne constitue pas une contrainte pour eux compte tenu de leur production élevée de fumure animale liée à charge animale élevée par hectare cultivé. Les agriculteurs et agro-éleveurs qui ont utilisé Cikeda ont estimé avoir amélioré leur niveau de connaissance sur la production de fumure et la fertilisation des cultures (Tableau XVI). En effet, les résultats de simulation et les discussions qui ont suivi l'analyse des sorties leur ont permis de quantifier l'ampleur des déséquilibres en termes d'apports de fumure organique. Cette acquisition de connaissance s'est matérialisée par une augmentation des stocks de fumure organique de 71 à 300 % lors de la dernière phase de la démarche (Figure 24.a) et une augmentation des doses

de fumure minérale chez 2 producteurs comparativement aux pratiques initiales (Tableau XVII).

Cette amélioration des connaissances se retrouve chez les agriculteurs et agro-éleveurs ayant utilisé les deux autres outils où le déséquilibre entre besoins et offre de fumure organique est également calculé. Ceci étant, la traduction de cette connaissance en pratique via l'augmentation des stocks de fumure organique produite n'est réelle que chez deux agriculteurs (Figures 24.b et 24.c). Pour les agro-éleveurs et éleveurs ayant déjà quelques notions sur la gestion de la fumure organique et de la fertilité du sol l'usage des outils n'a guère apporté de nouvelles connaissances.

**Tableau XVII :** Nombre de producteurs ayant modifié leurs pratiques en lien avec l'utilisation d'un des trois outils

Pratiques	Outils		
	Optimcikeda	Cikeda	Simflex
Introduction d'une culture fourragère	0	2	0
Augmentation des doses de fumure minérale sur maïs	3	2	2
Introduction d'un atelier d'embouche bovine	0	1	0

### 5.2.3.3. Planification des activités

Le processus de planification, en tant que réflexion du producteur sur l'organisation de la campagne à venir, constitue la base de la démarche d'accompagnement testée avec eux. De fait, les deux-tiers d'entre eux ont estimé avoir amélioré ce processus quel que soit l'outil utilisé, mais aussi le type dont relevait chaque exploitation (Tableau XVI). Ainsi les quatre producteurs impactés par l'utilisation de Cikeda sont deux agriculteurs, un agro-éleveur et un éleveur. Pour les trois premiers, l'usage de l'outil les a sensibilisés à la nécessité d'anticiper les apports de fumure organique de la prochaine campagne en récoltant des résidus de culture issus de la campagne précédente. L'agro-éleveur a également vu la nécessité de planifier la campagne d'embouche non pas après la saison des cultures comme il le faisait jusqu'ici, mais avant celle-ci *via* le dimensionnement de l'assolement fourrager et des stocks de résidus. L'éleveur a également pris conscience que la ration des animaux en saison sèche chaude à partir des cultures fourragères se planifie dès les choix d'assolement en début de saison des pluies.

Les agriculteurs et agro-éleveurs ont bénéficié de l'utilisation de Simflex en explicitant mieux les mécanismes qu'ils utilisent pour raisonner leurs surfaces en coton, en lien avec la marge espérée sur cette culture. L'exercice de planification conduit avec Optimcikeda a

surtout permis à deux agro-éleveurs, un agriculteur et un éleveur d'améliorer leur capacité à évaluer l'adéquation entre leurs ressources et les activités possibles au sein de l'exploitation. Il leur a permis de connaître par exemple le nombre d'actifs nécessaires pour pouvoir emblaver correctement toute la superficie allouée à la culture. Les autres producteurs ont été faiblement touchés du fait de l'éloignement entre leurs pratiques et les pratiques optimales fournies par l'outil.

#### *5.2.3.4. Calculs économiques liés aux activités agricoles*

La position des producteurs quant aux connaissances acquises *via* les modes de calculs des marges économiques des différents scénarios est relativement contrastée entre les outils (Tableau XVI) mais aussi les types d'exploitation. Les agriculteurs et agro-éleveurs pratiquant la culture du coton sont familiers de ce type de calcul du fait de l'appartenance à des groupements de producteurs qui leur apportent un appui à la gestion des comptes. Les éleveurs au contraire n'ont pas pour habitude de calculer leurs marges liées aux cultures céréalières, dans la mesure où ces productions sont autoconsommées. Cikèda et Simflex leur ont permis de se familiariser avec ce calcul.

Optimcikèda a eu un impact sur les connaissances des deux agriculteurs et des deux éleveurs, surpris par le revenu calculé. Avec cet outil, on passe en effet de budgets par culture à des résultats agrégés à l'échelle de l'ensemble de l'exploitation, correspondant à la solution maximisant le revenu. L'écart de revenu maximal et réel est souvent lié à la planification de l'assolement des producteurs qui ne tient pas entièrement compte de leur disponible en terme de main d'œuvre extérieure. Ainsi du fait d'un manque de main d'œuvre, l'entretien de certaines cultures est négligé ce qui se traduit par de faibles rendements. Cette mauvaise production végétale contribue le plus souvent à creuser l'écart entre revenu réel et celui optimal.

#### *5.2.4. Facilitation des apprentissages du chercheur*

Le simple fait d'utiliser et remplir un cadre formel, celui du modèle, pour décrire une exploitation agricole dans le cadre d'une démarche d'accompagnement, génère un ensemble de connaissances sur le cas étudié. La construction, la simulation et la discussion de scénarios prospectifs avec le producteur, représentent un moyen supplémentaire d'éclairer et de mieux comprendre sa logique de raisonnement. Au-delà de ces constats communs à l'ensemble des outils utilisés, des différences apparaissent entre outils selon le type de connaissance



technique, stratégique ou décisionnelle concerné. En effet chaque outil, compte tenu des processus modélisés, oriente le chercheur vers des types d'interactions spécifiques avec le producteur que ce soit pour le calibrer ou à la suite des discussions des résultats simulés. Ainsi des connaissances sur les pratiques techniques et les orientations stratégiques des exploitations ont été acquises avec Cikeda, alors que les processus de décision ont été mieux compris avec Simflex et marginalement avec Optimcikeda.

L'usage de Cikeda, du fait d'une plus grande liberté pour le producteur dans la définition des scénarios a permis au chercheur d'analyser les réponses qu'il souhaite apporter face aux problèmes rencontrés. Par exemple, dans la perspective de mieux gérer la baisse de la fertilité du sol, les agriculteurs tendent à déplacer les bœufs de trait sur les parcelles durant la saison sèche chaude afin qu'ils s'alimentent sur place des stocks fourragers et fertilisent le sol par leurs déjections.

Le calibrage de Simflex a nécessité des questions spécifiques sur les indicateurs déclenchant les règles de décision comme les choix d'assolement ou la mobilité des différents troupeaux de l'exploitation, sources d'enseignements spécifiques. Ainsi, lorsque le prix des engrais minéraux est très élevé, les agriculteurs préfèrent diminuer la superficie en maïs que de réduire les quantités d'engrais apportées à l'hectare afin de maintenir le rendement de cette culture. Les sorties ont également suscité des échanges sur l'évolution des pratiques de transhumance chez les éleveurs et agro-éleveurs.

Optimcikeda permet d'avoir des échanges sur les objectifs du ménage à l'issue des simulations. En effet, l'hypothèse selon laquelle le producteur cherche à maximiser son revenu, conduit à des discussions sur la façon dont les ménages articulent des objectifs différents tels que l'extension des surfaces de céréales chez les agro-éleveurs pour générer des revenus et le stockage des récoltes pour limiter le risque climatique. Le rôle du coton chez les agriculteurs a été également éclairé, à travers son triple objectif : (i) acquérir des engrais minéraux à crédit, (ii) maintenir la fertilité du sol à travers la rotation avec le maïs et (iii) alimenter la trésorerie de l'exploitation en début de saison sèche.

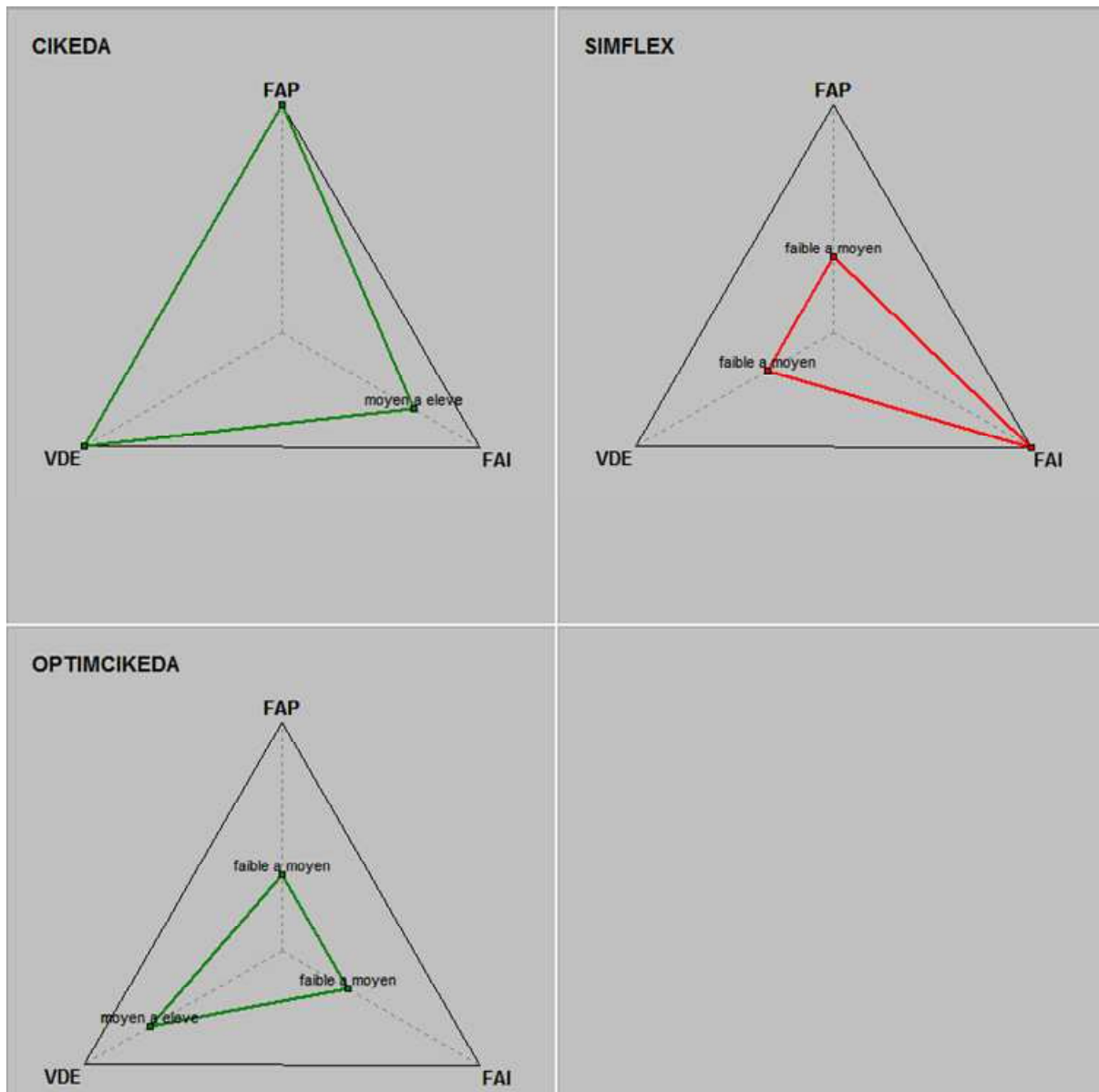
### ***5.2.5. Evaluation multicritère des trois outils***

La Figure 25 représente de façon synthétique l'ensemble des trois critères d'évaluation de l'utilisation des trois outils avec les producteurs. Cikeda présente le meilleur score puisque les producteurs ont validé la pertinence de ses résultats dans la planification des activités

agricoles. Ils ont également estimé avoir acquis de nouvelles connaissances qui se sont traduites par une évolution de leurs pratiques agropastorales. Pour le chercheur, cet outil mettant l'accent sur le fonctionnement technique de l'exploitation, a essentiellement permis d'acquérir de nouvelles connaissances sur les savoirs locaux de production agropastorale.

Le score obtenu par Simflex est moindre sur les deux critères concernant les producteurs, mais supérieur pour ce qui est du chercheur. La structure du modèle conceptuel et le fonctionnement pluriannuel de l'outil sont en effet relativement éloignés des modes de raisonnement des producteurs qui ne planifient leur activité que sur un pas de temps court. Néanmoins, son utilisation a permis au chercheur de mieux expliciter les règles de décision liées à la production agro-pastorale de l'ensemble des producteurs. Certaines règles ont été modifiées suite aux résultats des simulations, par exemple concernant la gestion de la culture du coton.

Optimcikèda présente un score également faible à moyen, mais sur les critères « facilitation des apprentissages du producteur et du chercheur ». Le cadre très spécifique de représentation de l'exploitation via une matrice de programmation linéaire, entraîne le plus souvent à des choix qui peuvent s'éloigner de la réalité vécue par les producteurs ayant des objectifs non liés étroitement à l'optimisation de leur revenu. Ceci étant, le critère « validation par les producteurs » obtient un score moyen à élever avec cet outil car l'écart entre le revenu réel et simulé peut être une source de réflexion pour ces derniers. En effet, la solution optimale tend à devenir un benchmark auquel ils peuvent se comparer à travers la maximisation du revenu, un indicateur en général évocateur pour les producteurs, qui peuvent ainsi évaluer l'intérêt d'une stratégie tournée vers la monétarisation de leur production, quand bien même elle s'éloigne de leurs stratégies actuelles.



**VDE** : Validation par les producteurs

**FAP** : Facilitation de l'apprentissage pour le producteur

**FAI**: Facilitation de l'apprentissage pour l'intervenant

**Figure 25** : Schéma d'évaluation de chaque modèle en fonction des trois critères utilisés (validation par les producteurs, facilitation d'apprentissage pour le producteur et facilitation d'apprentissage pour l'intervenant)

### 5.3. Discussion

#### 5.3.1. Modèles à l'échelle de l'exploitation pour quoi faire ?

Les résultats obtenus dans cette étude confirment le constat général que les modèles à l'échelle de l'exploitation favorisent la discussion entre leurs utilisateurs et les producteurs autour de la conception de systèmes de production innovants (Le Gal *et al.*, 2011), indépendamment de leurs cadres conceptuels et techniques de développement. Ils constituent

alors des outils intermédiaires pour aider à l'évaluation *ex-ante* d'une gamme d'alternatives et pour faciliter l'acquisition de nouvelles connaissances par les intervenants de la démarche (Martin *et al.*, 2013). Un modèle d'optimisation tel que Optimcikedà, marqué par des principes de construction relativement stricts, permet néanmoins de fournir des solutions potentielles aux producteurs cherchant à maximiser leur revenu, en fonction de leurs ressources disponibles (Bernet *et al.*, 2001 ; Cabrera *et al.*, 2008). Mais ce modèle a une portée limitée pour tous les producteurs ayant une logique de satisfaction des besoins alimentaires de la famille.

Un modèle de simulation plus flexible tel que Cikedà colle mieux à la réalité des producteurs et s'avère d'autant plus utile que ceux-ci ont en tête des projets d'évolution de leurs systèmes de production. Cikedà répond alors pleinement à l'objectif exploratoire sur lequel se fonde la réflexion prospective du producteur en interaction avec le chercheur (Kerr *et al.*, 1999 ; Le Gal *et al.*, 2013 ; Martin *et al.*, 2013). Il permet également d'améliorer certaines connaissances techniques des producteurs et de resituer certaines innovations dans le contexte spécifique de l'exploitation. Il peut donc s'avérer utile lors de la diffusion d'une innovation technologique, en permettant d'en mesurer *ex-ante* les conséquences sur les résultats des exploitations.

Un modèle de simulation pluriannuel tel que Simflex, qui interroge la robustesse des processus de décision du producteur face aux risques climatiques et économiques, permet au chercheur de mieux identifier ces processus. Mais il fournit en général moins d'informations aux producteurs que les précédents outils du fait de son décalage conceptuel avec leurs comportements face aux aléas. Néanmoins avec les différentes discussions suscitées par les sorties de ce modèle, il permet au chercheur une très bonne compréhension des pratiques agricoles des producteurs.

### ***5.3.2. Quelle adéquation entre la conception des outils et la réalité des producteurs ?***

En fournissant une représentation simplifiée d'une réalité, le concepteur de modèles oriente par ses choix l'utilisation qui pourra en être faite avec son public cible. En ce sens, la nature des processus modélisés influent sur la nature des connaissances produites du côté chercheur et producteur et sur la nature des changements de pratiques envisageables dans le cadre d'une démarche d'accompagnement (van Wijk *et al.*, 2009 ; Andrieu *et al.*, 2012). La diversité des exploitations rencontrées dans une même région vient compliquer la recherche de cette

adéquation entre les outils conçus et les questionnements des producteurs. Par exemple Cikèda a bien répondu aux attentes des agriculteurs et agro-éleveurs en intégrant leurs pratiques d'affouragement des différents lots d'animaux à partir des résidus de récolte et en ouvrant la possibilité d'évaluer l'intérêt de l'introduction d'une culture fourragère. Mais ce modèle s'est avéré moins bien adapté à la situation des éleveurs, où pâturage et transhumance constituent la base du système alimentaire des animaux. Simflex a mieux répondu aux pratiques de ces derniers, en fournissant en sortie la durée de la transhumance.

Ce constat souligne les limites des modèles « adhoc » dont la structure et le domaine de validité collent trop à une certaine réalité. Ils ont souvent pour but d'améliorer les systèmes de production existants afin de satisfaire de nouveaux objectifs identifiés par les producteurs (Keating *et al.*, 2003 ; Woodward *et al.*, 2008) et de les impliquer dans le processus d'élaboration des modèles (Voinov et Bousquet, 2010). L'exemple étudié ici montre que même en se restreignant à une petite région agricole, la diversité des systèmes de production rencontrés ne peut être correctement traitée avec un seul modèle. Certes il est envisageable de multiplier les modèles dans une posture de recherche, comme cela a été fait ici. Mais ce choix paraît difficilement compatible avec un contexte d'accompagnement des producteurs, où des modèles spécifiques à un nombre limité d'exploitations et au domaine de validité trop étroit, seront peu utilisés par les intervenants (McCown *et al.*, 2009).

Néanmoins, l'utilisation de ces modèles peut être repensée en adaptant le choix de ces modèles au type de question que l'on souhaite aborder avec le producteur. Ainsi, on peut privilégier l'usage d'Optimcikèda et de Cikèda pour analyser avec les producteurs des changements à courts termes et utiliser Simflex pour traiter de changements à long-terme.

#### **5.4. Conclusion partielle**

Cette étude a permis de tester et comparer l'usage de trois modèles de simulation ayant des bases conceptuelles différentes pour accompagner des exploitations agricoles de l'Ouest du Burkina Faso dans la planification de leurs activités productives. De cette comparaison il ressort que le modèle le plus proche des réalités et des questionnements des producteurs est celui qui s'appuie sur une représentation de leurs pratiques et des flux physiques de matière internes à l'exploitation et sur des principes simples de calcul à base de bilans en ressources. Ce modèle facilite les apprentissages des producteurs, mais demande à son utilisateur de dépasser la seule manipulation des variables quantitatives pour approfondir sa connaissance

des logiques de décision du producteur. Le modèle de simulation en tant qu'objet intermédiaire, peut stimuler ces échanges sous réserve que son utilisateur sache aller au-delà d'une simple collecte de données. Le modèle à base de règles a des effets inverses. Sa structure plus complexe, pluriannuelle et réduite à certaines composantes de l'exploitation, le rend plus difficile à comprendre par les producteurs. Mais son utilisation oblige le chercheur à mieux appréhender les processus de décision du producteur, au moins pour les règles concernées. Le modèle d'optimisation apparaît de prime abord le moins adapté à un usage en accompagnement, de par ses principes de conception qui l'éloigne de la réalité des producteurs. Néanmoins la confrontation entre la logique interne de ce modèle et celle des producteurs peut stimuler la réflexion plus stratégique autour des chemins conduisant à l'amélioration du revenu de l'exploitation. Pris dans leur ensemble, ces 3 modèles constituent donc des supports complémentaires de discussion pouvant aider le producteur et le chercheur à améliorer leurs connaissances croisées sur les pratiques agropastorales et sur les alternatives possibles pour atteindre les objectifs de l'exploitation.

## Chapitre 6 : Discussion générale

### 6.1. Quelles réflexions pour améliorer la production agropastorale ?

Notre réflexion participative dans cette étude avec les producteurs a porté sur une meilleure intégration des activités de l'agriculture à celles de l'élevage et permet d'apporter des éléments de réponse aux trois premières hypothèses. Ainsi, l'hypothèse 1 a été confirmée car les pratiques actuelles des producteurs de l'Ouest du Burkina Faso ne favorisent pas une amélioration de la fertilité chimique de leur sol. L'hypothèse 2 a été partiellement confirmée. En effet, on note qu'avec la ferme volonté des producteurs de tendre vers une bonne intégration agriculture – élevage, leurs ressources actuelles limitent cette mise en place réelle (van Wijk *et al.*, 2009). Or dans les travaux de Vall *et al.* (2006) et Janssen (1993), l'intégration agriculture – élevage qui s'applique différemment d'une exploitation à une autre influence positivement la production agropastorale. Dans ce cas précis, elle est limitée par la trop grande superficie des producteurs comparativement au disponible en fumure organique de l'exploitation ou aux nombres élevés de bovins d'élevage au regard du disponible fourrager. Des compromis sont nécessaires dans les deux situations pour aboutir à cette bonne intégration agriculture – élevage. Ces compromis doivent permettre une gestion rationnelle de la superficie totale cultivée (assolement) en tenant compte du disponible en termes de fumure organique et des apports conséquents de fumure minérale. Cette hypothèse, gage d'un maintien/ une amélioration de la fertilité des sols (Ouedraogo *et al.*, 2001 ; Traore *et al.*, 2007) est difficilement applicable dans le contexte actuel de nos exploitations. Également, une réduction du nombre d'animaux d'élevage en lien avec le disponible fourrager et les parcours naturels et l'augmentation du compostage dans les exploitations, permettra de réduire considérablement le déficit fourrager souvent constaté en saison sèche chaude. L'hypothèse 2 a été vérifiée car l'utilisation participative du modèle de simulation sans modélisation des règles de décision du producteur a permis d'améliorer la stratégie du producteur d'intégration agriculture-élevage. En effet, les différentes réflexions ont été aidées et concrétisées grâce au modèle de simulation cikɛda qui a permis une lecture rapide des résultats des scénarios co-conçus (Andrieu *et al.*, 2012).

Une analyse par type de producteur montre que les petites exploitations (les agriculteurs en majorité) peuvent tendre vers cette intégration agriculture – élevage de manière durable. En effet, dans ses exploitations, les décisions sont pour la plupart prises par le chef de l'exploitation et le nombre limité de bouches à nourrir permet de mieux gérer l'assolement en

tenant compte du disponible en fumure organique et du petit noyau d'élevage de bovins de trait. Les grandes exploitations possédant en majorité de grandes superficies et un grand effectif de bouches à nourrir ont souvent des instances de décision plus complexes que chez les petites exploitations. En plus, en l'absence de filières dynamiques et structurées, notamment autour de la production laitière, de viande, il paraît difficile à des producteurs d'investir durablement dans les activités d'élevage à grande échelle. Chez les éleveurs, le nombre souvent élevé de bovins d'élevage et le caractère mobile de leur troupeau empêchent une bonne intégration agriculture – élevage. En effet, le troupeau est alimenté presque exclusivement au niveau des parcours naturels, sur les parcelles de culture après les récoltes et la culture de plantes fourragères est encore marginale. Cette dernière pratique marginale est faite dans l'optique d'alimenter les bœufs d'embouche dans certaines exploitations. Dans d'autres exploitations d'éleveurs, cette pratique n'est pas courante, car les bœufs d'élevage sont directement choisis dans le troupeau pour la vente. Cette activité d'embouche bovine constitue pourtant une motivation pour les agro-éleveurs qui est une autre source de revenus pour l'exploitation (Sempore *et al.*, 2011) et permet d'augmenter considérablement le disponible en fumure organique de l'exploitation. Ces différentes réflexions et analyses ont été possibles grâce à l'utilisation du modèle de simulation qui a permis de tester rapidement leurs mises en œuvre (Keating et McCown, 2001 ; Rellier, 2005 ; Le Gal *et al.*, 2010). Mais qu'en est-il des deux autres modèles différemment conçus dans notre contexte et ayant des principes de modélisation différents ?

## **6.2. Les modèles numérisés permettent-ils d'aider les producteurs dans leurs réflexions et selon quelles modalités ?**

À travers les chapitres 4 et 5 de cette étude, nous avons vérifié notre hypothèse 3. En effet, chaque modèle utilisé dans cette étude a apporté des connaissances spécifiques dans l'aide à la réflexion des producteurs vers des changements agropastoraux à court et moyen termes. Les modèles ont été utilisés dans une démarche participative qui a eu un rôle bénéfique sur l'apprentissage (Le Gal *et al.*, 2011 ; Martin *et al.*, 2013) des producteurs, mais également du chercheur. Au-delà d'une simple évaluation des trois modèles de simulation, la démarche participative a favorisé des échanges d'idées entre chercheur et producteurs (Attonaty *et al.*, 1999 ; Sterk *et al.*, 2006, Rossing *et al.*, 2007). Carberry *et al.* (2002) précisent que l'utilisation du modèle permet de renforcer les capacités d'apprentissage des agriculteurs en leur permettant d'une part d'acquérir une expérience sur leur système en testant différents



scénarios *in silico*, et d'autre part de comprendre plus finement les causes d'un résultat, en les faisant réfléchir sur les répercussions de leur mode de conduite. Le chapitre 5 illustre cette acquisition de connaissances chez les producteurs et le chercheur à travers l'utilisation des trois modèles de simulation. En mobilisant plusieurs composantes d'une exploitation agricole, ces outils de simulation ont le mérite d'être appréciés différemment par les producteurs qui voient se dérouler leurs activités agropastorales dans un temps relativement court.

L'évaluation des trois types de modèles devait permettre d'identifier les préférences particulières de chaque type de producteurs de cette étude et par là favoriser le choix du type de modèle qui sied dans l'accompagnement des producteurs. L'étude n'a pas permis cela car les agriculteurs et agro-éleveurs avaient pratiquement les mêmes difficultés liées à la baisse de la production agricole. Les éleveurs avaient des difficultés propres à leur mode d'élevage transhumant et qui demandaient d'autres réflexions liées à ce système. Les agro-éleveurs qui possèdent des bovins d'élevage ne perçoivent pas l'élevage actuel comme une seconde source de revenus après l'agriculture. Ainsi les trois modèles, ont été diversement appréciés par l'ensemble des producteurs. *Optimikeda* qui traite de la maximisation du revenu des exploitants n'a pas pu permettre une conception d'un système intégrant la baisse de la production végétale liée à la baisse de la fertilité du sol. Cela a été prouvé par Martin *et al.* (2013), car l'optimisation est essentiellement un cadre d'application de la contrainte qui délimite l'espace de solution. *Simflex* qui met l'accent sur les règles liées à la culture du coton et des céréales à long terme, avait pratiquement les mêmes sorties annuelles que le modèle *Cikeda* mais n'a pas convaincu les producteurs qui n'ont généralement pas de réflexions sur les activités à planifier sur le long terme. Seul *Cikeda* a permis une conception intégrant les scénarios de la majorité des producteurs. Ce modèle a semblé plus adéquat dans l'accompagnement des deux types de producteurs (agriculteurs et agro-éleveurs). Chez les éleveurs, le problème était plus complexe, car devait prendre en compte le pâturage. Des trois modèles, seul *Simflex* traitait de manière partielle l'aspect mobilité du troupeau en fonction de l'environnement économique. Cette combinaison de l'environnement économique dans la mobilité du troupeau des éleveurs n'a pas permis à cette catégorie de producteurs de concevoir des stratégies alternatives de réduction du déficit fourrager du troupeau. Elle a plutôt favorisé la compréhension des règles de décision par le chercheur sur la mobilité du troupeau chez les éleveurs.

Pour accompagner les producteurs dans la planification de leurs activités agro-pastorales, *Cikeda* semble offrir de meilleures possibilités que les deux autres modèles. En effet, ce

modèle avait été créé dès le départ pour un but d'accompagnement des producteurs et il convient avant toute conception, de bien penser à l'usage souhaité pour ces modèles. L'ensemble des trois modèles, au-delà de leurs modes de conception, favorise des échanges et partages de connaissances. Ils peuvent favoriser une analyse des interactions entre les systèmes de culture et d'élevage au sein de la même exploitation (Andrieu *et al.*, 2012).

### **6.3. Quels intérêts et limites méthodologiques peut-on tirer de cette étude ?**

La démarche utilisée dans cette étude se base sur des outils de simulation ad-hoc et la mise en évidence de tendances entre scénarios. Cette approche participative se fonde sur un certain nombre de simplifications afin de favoriser la bonne compréhension des sorties des 3 modèles par les producteurs. Ainsi les références utilisées qui sont pour la plupart communes aux trois modèles ne tiennent pas compte de la diversité des types de sols, ou des teneurs réelles en nutriments contenus dans les différentes fumures organiques et différents fourrages rencontrés dans les exploitations agricoles de la zone d'étude. Elles sont issues de la littérature existante sur la zone d'étude. Également certaines relations entre niveaux de fertilisation/rendement/climat sont fondées sur des connaissances d'expert et non sur des relations mécanistes telles qu'on peut les trouver dans certains modèles de cultures (Keating *et al.*, 2003). Mais ces modèles de culture sont souvent complexes pour être utilisés avec les producteurs dans l'accompagnement à la conception de systèmes agropastoraux innovants (Le Gal *et al.*, 2011).

Évaluer l'impact de l'utilisation d'une démarche d'accompagnement, avec ou sans outil formalisé, se révèle un exercice délicat (Birner *et al.*, 2009 ; Faure *et al.*, 2011) a fortiori dans un contexte où le chercheur joue le rôle de conseiller (Vayssières *et al.*, 2009). En intervenant directement, le chercheur s'assure de la bonne utilisation des outils qu'il a lui-même contribué à créer. Il s'assure également de la participation active des producteurs, tant dans le diagnostic de leur exploitation que dans l'analyse des résultats des outils. Ainsi, les producteurs peuvent analyser de façon systémique les problèmes qu'ils rencontrent au sein de leurs exploitations, afin de définir des solutions pour y remédier et de les comparer en évaluant leur faisabilité (Le Gal *et al.*, 2013) qui varie fortement en fonction des caractéristiques structurelles propres à chaque exploitation. Cette interaction ne peut cependant correctement se gérer et s'analyser que sur de petits échantillons d'exploitations (Muchagata et Brown, 2003 ; Hostiou et Dedieu, 2009).

Mais en n'étant plus seulement observateur, le chercheur doit évaluer lui-même ce qu'il a retiré de la démarche, tout en sachant que ses apprentissages sont fonction de la manière dont il a conduit l'interaction avec les différents producteurs rencontrés. Analysant ce lien chercheur-producteur, Sterk *et al.* (2011) montrent que l'utilisation des outils de simulation permet de créer une base pour discuter des alternatives (Martin *et al.*, 2013) et contribue ainsi à la résolution de différents problèmes posés par les acteurs, en fonction de l'adéquation entre leurs besoins et les outils proposés. L'évaluation de l'impact de l'outil devient alors complexe puisqu'elle mêle à la fois les perceptions individuelles du chercheur et du producteur sur la démarche et ses résultats (quel fonctionnement de l'interaction ?), l'existence d'une demande plus ou moins bien explicitée de la part du producteur (quels questionnements ?) et la capacité de la démarche à répondre à cette demande (quel domaine de validité ?). Pour dépasser ces limites, l'intervention d'une tierce personne, observant le déroulement de la démarche en temps réel ou l'évaluant ex-post, serait utile, mais est rarement mise en œuvre pour des raisons de compétences et de coûts nécessaires (Moumouni *et al.*, 2009).

#### **6.4. Quelles perspectives pour un meilleur accompagnement des producteurs intégrant les modèles ?**

Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle par producteur en tenant compte des trois types de producteurs rencontrés dans la zone afin de faciliter la démarche d'utilisation des outils auprès de ces derniers. Une autre alternative à tester serait l'utilisation séquentielle des trois modèles avec un seul producteur. Cette utilisation aurait pour but d'évaluer la complémentarité des trois outils pour accompagner une exploitation agricole dans la planification de ses activités agropastorales.

Une seconde perspective serait de coupler les modèles de simulation aux Technologies de l'Information et de la Communication (TICs) pour accompagner les producteurs vers de nouvelles stratégies de production agricole. En effet, les TICs se sont développées en Afrique essentiellement à travers le téléphone portable, la radio rurale ou la vidéo. Elles visent à faciliter l'accès des paysans aux informations susceptibles d'éclairer leurs choix (informer sur les marchés et les prix, communiquer sur de nouvelles technologies). On note un décalage entre les usages actuels des TICs, centrés sur la diffusion descendante d'informations, et les situations de gestion auxquelles sont confrontés les paysans et les conseillers qui nécessitent de faire des choix dans les informations disponibles et de produire selon chaque situation, des

connaissances utiles et utilisables. Partant de ce constat et dans la suite de ces travaux, il s'agira donc de mobiliser le téléphone portable largement utilisé par les producteurs, les modèles de simulation qui offrent une aide à la réflexion et à la planification et les informations fournies par Internet dans le conseil agricole en milieu rural en vue d'améliorer la productivité agropastorale. Elle se fera à travers une démarche participative intégrant les producteurs, les conseillers agricoles, les gouvernants et les chercheurs.

Une troisième perspective est d'explorer l'intérêt de l'utilisation de ces outils dans le cas spécifique du conseil. Il s'agira de mener des études concernant la nécessité d'appropriation de ces outils par les différentes institutions de conseil agricole au Burkina et en Afrique de l'Ouest. Cette étude devra permettre d'identifier les types d'usages avec les producteurs (collectif versus individuel) et avec les conseillers (formation des conseillers sur approche systémique). Elle permettra également d'analyser l'influence du background des conseillers agricoles sur l'usage des outils avec les producteurs.

## Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons cherché à analyser les intérêts et limites de la modélisation à l'échelle de l'exploitation agricole dans un processus d'aide à la conception de systèmes agropastoraux innovants impliquant des chercheurs et des producteurs pris individuellement. Elle a également permis de dégager avec les producteurs des voies d'amélioration de la gestion de la fertilité des sols par une meilleure intégration de l'agriculture à l'élevage. Nous avons présenté au regard de la baisse de la production due à la baisse de la fertilité des sols constatée par les producteurs, les éléments chimiques (pHeau, pH<sub>KCl</sub>, C, Mo, N) des sols des différentes exploitations concernées par cette étude. Cette caractérisation de la fertilité chimique des sols avait pour but d'évaluer avec les producteurs et par voie de simulation, l'efficacité de leurs stratégies actuelles et des stratégies alternatives d'intégration agriculture-élevage sur la production agropastorale. Elle a été possible grâce à l'utilisation du modèle Cikeda. Nous avons à l'issue de cette évaluation des différentes stratégies, tenté de préciser le lien entre conception et usages d'outils de simulation relevant des trois familles de concepteur d'outils (la simulation dynamique, l'optimisation maximisant le revenu sous contraintes et la simulation des décisions des producteurs sous forme de règles), dans une démarche d'accompagnement à la planification de la campagne agricole impliquant des chercheurs et des producteurs pris individuellement. Ainsi la démarche proposée a été une utilisation de chaque modèle par producteur en fonction de sa typologie pour aider à la planification des campagnes agricoles de 2011 et de 2012. La posture adoptée durant cette étude était la participation des producteurs à la co-conception de l'évolution de leur propre exploitation.

Dans le chapitre 3, le diagnostic des propriétés chimiques des sols des différentes exploitations agricoles des villages de Koumbia et Waly, montre que : (i) les sols des trois types de producteurs (agriculteurs, agro-éleveurs, éleveurs) rencontrés dans la zone ont sensiblement les mêmes teneurs en éléments minéraux, (ii) les sols ont des pHeau compris entre 6,46 et 6,93, (iii) le taux de matière organique dans le sol varie de 1,82 à 1,98% sur les parcelles ayant bénéficié d'un apport quelconque de fumure organique et de 1,23 à 1,70% sur les parcelles qui n'ont pas bénéficié d'apport de la fumure organique, (iv) les sols qui ont bénéficié d'un apport combiné de fumure organique et minérale contiennent plus de matières organiques et d'azote total que ceux sans fumure ou avec fumure minérale seule. Cette différence de teneur en éléments chimiques sur les différentes parcelles est liée aux différentes pratiques de gestion des parcelles chez les producteurs. Ces derniers sont conscients de la baisse de la fertilité des sols due à leurs pratiques et quelques-uns ont tenté de concevoir des

stratégies pouvant contribuer à améliorer durablement le niveau de fertilité des sols tout en intégrant l'élevage à l'agriculture.

Le chapitre 4 a présenté une analyse de différentes stratégies actuelles des producteurs et alternatives d'une bonne intégration agriculture-élevage à travers l'utilisation du modèle de simulation Cikeda. La démarche a consisté à la co-conception de manière itérative et individuelle de scénarios visant une meilleure intégration de l'agriculture à l'élevage chez un petit groupe de producteurs dont des agriculteurs, des agro-éleveurs et des éleveurs de notre zone d'étude. Ces scénarios ont été simulés avec le modèle Cikeda et les résultats ont été comparés à ceux des pratiques actuelles de ces producteurs. Cette étude a révélé que les producteurs ont des connaissances diverses en matière d'alimentation du troupeau, de gestion de la fumure organique, et d'adéquation entre production de fourrage et production de fumure organique. Tous les producteurs établissent un lien positif entre l'augmentation de la fumure organique produite et l'augmentation de la production végétale (rendement grain et paille), mais l'inverse n'est perçu que par les éleveurs. Cette capitalisation des connaissances des producteurs a permis de se rendre compte à travers la simulation que moins de 15% des superficies totales cultivées des agriculteurs et agro-éleveurs reçoivent une dose de fumure organique conforme aux normes recommandées par la recherche (2000 kg/ha/an). Également, chez les éleveurs, le troupeau est fortement dépendant du disponible fourrager à l'échelle du village et seuls les bovins malades, les bovins de trait et certaines vaches sont alimentés en saison chaude à partir de leurs stocks fourragers. Les scénarios co-conçus ont permis d'améliorer la production de fumure organique de l'ordre de 50 à 200% chez les agriculteurs et de l'ordre de 0 à 36% chez les agro-éleveurs. Malgré cette augmentation de la production de la fumure organique qui tient compte de la structure de chaque exploitation, on constate à travers la simulation que les surfaces fertilisées en fumure organique chez les producteurs restent faibles comparativement à la surface totale cultivée et légèrement supérieures à celles des pratiques initiales. Les bilans fourragers des éleveurs simulés par le modèle Cikeda restent déficitaires en année climatique défavorable malgré l'augmentation des stocks fourragers à travers l'initiation de la culture fourragère et la réduction virtuelle de la taille du troupeau. Pour la réduction de la taille du troupeau chez les éleveurs, cela va nécessiter une modification de la structure de l'exploitation et un changement des modes de pratiques des éleveurs. Ces changements ne sont pas bien perçus par ces derniers ayant pour seule activité pastorale la mobilité de leur troupeau à la recherche de pâturage. Au regard de toutes ces

difficultés, l'intégration agriculture-élevage dans un tel contexte présente des limites qui freinent la productivité agropastorale des exploitations à long terme.

Dans le chapitre 5 nous avons utilisé les trois outils de simulation pour accompagner les 18 exploitations de la zone d'étude dans la planification de leurs campagnes agricoles de 2011 et 2012. Elle a permis aux producteurs d'évaluer chaque outil et nous avons pu analyser l'impact de chaque outil dans la production de connaissances chez les producteurs et les chercheurs. Cette évaluation a été faite autour des scénarios visant à une adaptation des assolements à l'aléa pluviométrique, l'ajustement de la sole de coton au contexte économique, la gestion de la fertilité du sol et l'alimentation des animaux. Ainsi, nous avons noté que l'ensemble des producteurs a jugé que la planification de l'assolement et l'influence des facteurs climatiques/économiques sont bien prises en compte par les trois modèles, mais la pertinence des résultats du modèle Cikèda a été très bien appréciée comparativement aux deux autres modèles. Également, les producteurs ont trouvé que la production de fumure organique et la fertilisation sont représentées de façon pertinente avec ce modèle. Sur les 5 thèmes élaborés par les producteurs, les sorties de Cikèda sont donc jugées plus pertinentes par les producteurs que celles des deux autres outils, car elles permettent de représenter de façon flexible les scénarios agropastoraux en limitant le nombre d'hypothèses sur les processus représentés. En ce qui concerne le modèle Simflex, ceux qui l'ont utilisé, avaient des difficultés de compréhension des sorties pluriannuelles, car ils ne planifient pas leur campagne agricole au-delà d'une année. Les sorties d'Optimcikèda n'ont pas convaincu les producteurs qui trouvent qu'il n'inclut pas assez de facteurs entrant dans leurs prises de décision souvent « irrationnelle » sur le plan économique. En termes d'acquisition de connaissances, la majorité des producteurs déclarent avoir amélioré leurs connaissances et pratiques dans le cadre de la démarche d'accompagnement avec les trois modèles, mais l'utilisation de Cikèda a produit plus de connaissances que les deux autres. Du point de vue chercheur, l'utilisation de Cikèda a permis une acquisition des connaissances techniques et stratégiques des producteurs, celle de Simflex et Optimcikèda ont favorisé l'acquisition de connaissances décisionnelles.

Accompagner les producteurs vers de nouvelles stratégies de production avec les outils de simulation et d'optimisation nous a été bénéfique sur le plan scientifique. Au terme donc de cette étude qui a permis d'analyser le type d'outils qui sied pour l'accompagnement des producteurs, il convient de rappeler que les stratégies actuelles de production agropastorale fragilisent la durabilité des systèmes agricoles. De nombreuses perspectives regroupant

plusieurs composantes (recherche, développement et politique) ont été dégagées dans cette étude pour faire face à cette situation. L'accompagnement des producteurs doit donc se faire de manière synergique afin d'aider les producteurs qui sont plus que jamais tournés vers une exploitation continue des ressources naturelles à la recherche de la sécurité alimentaire.



## Références bibliographiques

- Agbonlahor, M. U., Aromolaran, A. B. & Aiboni, V. I. 2003. Sustainable Soil Management Practices in Small Farms of Southern Nigeria: A Poultry-Food Crop Integrated Farming Approach. *Journal of Sustainable Agriculture*, 22, 51-62.
- Andrieu, N. & Chia, E. 2012. Un modèle de simulation pluriannuelle des systèmes de production d'Afrique subsaharienne : Simflex. Partenariat, modélisation, expérimentations : quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique ? In Actes du séminaire ASAP, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 15 - 17 novembre 2011.
- Andrieu, N., Dugué, P., Le Gal, P. Y., Rueff, M., Schaller, N. & Sempore, A. 2012. Validating a whole farm modelling with stakeholders : Evidence from a West African case. *Journal of Agricultural Science*, 4, 159-173.
- Andrieu, N. & Nogueira, D. M. 2010. Modeling biomass flows at the farm level: A discussion support tool for farmers. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 505-513.
- Andrieu, N., Poix, C., Josien, E. & Duru, M. 2007. Simulation of forage management strategies considering farm-level land diversity: Example of dairy farms in the Auvergne. *Computers and Electronics in Agriculture*, 55, 36-48.
- Attonaty, J. M., Chatelin, M. H. & Garcia, F. 1999. Interactive simulation modeling in farm decision-making. *Computers and Electronics in Agriculture*, 22, 157-170.
- Attonaty, J. M. & Soler, L. G. 1991. Des modèles d'aide à la décision pour de nouvelles relations de conseil en agriculture. *Economie rurale*, 206, 37-45.
- Aubert, S., Fourage, C., Van Paassen, A., Perez, P., Mathevet, R., Barnaud, C. & Antona, M. 2010. Une contribution de la recherche au développement durable. In: Quae (ed.) La modélisation d'accompagnement. Une démarche participative en appui au développement durable. *Update Sciences technologies*, 9, 203-221.
- Bacyé, B., Moreau, R. & Felleret, C. 1998. Décomposition d'une poudrette de fumier incorporée dans un sol sableux de versant et un sol argilo-limoneux de bas-fond en milieu soudano-sahélien. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 83-92.
- Bado, B. V., Sedego, M. P., Cescas, M. P., Lompo, F. & Bationo, A. 1997. Effets à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina-Faso. *Cahiers Agricultures*, 6 (6), 547-626.
- Badolo, H. 2009. Monographie de la région des Hauts-Bassins, Ministère de l'Economie et des Finances, Ouagadougou, Burkina Faso, 154 p.
- Barbier, B. 1994. Modélisation Agronomique et Economique de la Durabilité d'un Système Agraire Villageois : le cas du village de Bala au Burkina Faso. Thèse de Doctorat, ENSAM-Montpellier, France, 328 p.
- Barbier, B. 1998. Induced innovation and land degradation: Results from a bioeconomic model of a village in West Africa. *Agricultural Economics*, 19, 15-25.
- Barbier, B., Benoit-Cattin, M., Leclerc, G. & Ruas, J. F. 2004. Pour une agriculture plus durable des pays sahéliens: simulations dynamiques de l'impact de la pression démographique sur l'agriculture du Sénégal et du Burkina Faso. Colloque développement durable, Ouagadougou, Burkina Faso, pp 15-20.
- Barbier, B. & Cattin, M. 1997. Viabilité d'un système agraire. *Economie Rurale*, 239 p.

- Basu, P. & Scholten, B. A. 2012. Crop–livestock systems in rural development: linking India's Green and White Revolutions. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 10, 175-191.
- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B. & Kimetu, J. 2007. Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural Systems*, 94, 13-25.
- Bazzaz, F. & Sombroek, W. 1996. Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes, John Wiley, FAO, Rome, Italy, 196 p.
- Berentsen, P. B. M. & Giesen, G. W. J. 1995. An Environmental-Economic Model at Farm Level to Analyse Institutional and Technical Change in Dairy Farming. *Agricultural Systems*, 49, 153-175.
- Berger, M. 1996. L'amélioration de la fumure organique en Afrique soudano-sahélienne. *Agriculture et développement*, Numéro hors-série.
- Berger, M., Belem, P. C., Dakouo, D. & Hien, V. 1987. Le maintien de la fertilité dans l'Ouest du Burkina Faso et la nécessité de l'association agriculture-élevage. *Coton Fibre Tropical*, 3, 201-210.
- Bergez, J.-E., Charron, M.-H., Leenhardt, D. & Poupa, J.-C. 2012. MOUSTICS: A generic dynamic plot-based biodecisional model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 82, 8-14.
- Bernard, J., Le Gal, P. Y., Triomphe, B., Hostiou, N. & Moulin, C. H. 2011. Involvement of small-scale dairy farms in an industrial supply chain: when production standards meet farm diversity. *Animal*, 5, 961-71.
- Bernet, T., Ortiz, O., Estrada, R. D., Quiroz, R. & Swinton, S. M. 2001. Tailoring agricultural extension to different production contexts: a user-friendly farm-household model to improve decision-making for participatory research. *Agricultural Systems*, 69, 183-198.
- Birner, R., Davis, K., Pender, J., Nkonya, E., Anandajayasekeram, P., Ekboir, J., Mbabu, A., Spielman, D. J., Horna, D., Benin, S. & Cohen, M. 2009. From Best Practice to Best Fit: A Framework for Designing and Analyzing Pluralistic Agricultural Advisory Services Worldwide. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 15, 341-355.
- Blanchard, M. 2006. Relations agriculture élevage en zone cotonnière : territoire de Koumbia et Waly, Burkina Faso, Mémoire DESS, Université Paris XII, Val de Marne, France, 66 p.
- Bohanec, M. & Rajkovič, V. 1999. Multi-attribute decision modeling: Industrial applications of DEXI. *Informatica*, 23, 487-491.
- Bonzi, M. 2002. Evaluation et déterminisme du bilan de l'azote en sols cultivés du centre Burkina Faso : Etude par traçage isotopique N15 au cours d'essais en station et en milieu paysan. Thèse de Doctorat Unique en Sciences Agronomiques, ENSAIA, Nancy, France, 177 p.
- Bonzi, M., Lompo, F. & Sédogo, P. M. 2004. Effet de la fertilisation minérale et organo minérale du maïs et du sorgho en sol ferrugineux tropical lessivé sur la pollution en nitrates des eaux. In Actes du Forum National sur la Recherche Scientifique et les Innovations Technologiques (FRSIT) Ouagadougou, Burkina Faso, 18 p.

- Bood, R. & Postma, T. 1997. Strategic learning with scenarios. *European Management Journal*, 15, 633-647.
- Bougouma-Yaméogo, V. 1997. Influence de la qualité du fourrage et du taux de concentré sur les performances de croissance et d'engraissement de béliers « Djallonké » de type « Mossi ». *Revue Méd. vét.*, 299-306.
- Boulet, R. & Leprun, J. C. 1969. Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Est., Dakar, ORSTOM, 331 p.
- Bradshaw, B., Dolan, H. & Smit, B. 2004. Farm-Level Adaptation to Climatic Variability and Change: Crop Diversification in the Canadian Prairies. *Climatic Change*, 67, 119-141.
- Bryceson, D. 2000. Rural Africa at the Crossroads : Livelihood Practices and Policies. *Overseas Development Institute*, 52, 6 p.
- Bunasols. 1985. Etat de connaissance de la fertilité des sols du Burkina Faso. Ouagadougou, Burkina Faso, 47 p.
- Buyse, J., Van Huylenbroeck, G., Vanslebrouck, I. & Vanrolleghem, P. 2005. Simulating the influence of management decisions on the nutrient balance of dairy farms. *Agricultural Systems*, 86, 333-348.
- Cabanilla, L., Abdoulaye, T. & Sanders, J. 2004. Economic costs of non-adoption of Bt-cotton in West Africa: with special reference to Mali. *International Journal of Biotechnology*, X, 1-16.
- Cabrera, V., Breuer, N. & Hildebrand, P. 2008. Participatory modeling in dairy farm systems: a method for building consensual environmental sustainability using seasonal climate forecasts. *Climatic Change*, 89, 395-409.
- Cabrera, V. E., Breuer, N. E., Hildebrand, P. E. & Letson, D. 2005. The dynamic North Florida dairy farm model: A user-friendly computerized tool for increasing profits while minimizing N leaching under varying climatic conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49, 286-308.
- Carberry, P. S., Hochman, Z., McCown, R. L., Dalgliesh, N., Foale, M. A., Poulton, P. L., Hargreaves, J. N. G., Hargreaves, D. M. G., Cawthray, S., Hillcoat, N. & Robertson, M. J. 2002. The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', researchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation. *Agricultural Systems*, 74, 141-177.
- Centre Agro Entreprise, 2000. Manuel des bonnes pratiques pour l'alimentation du bétail et de la volaille. Alimentation du troupeau laitier. 54 p.
- César, J. & Coulibaly, J. 1990. Le rôle des jachères et des cultures fourragères dans le maintien de la fertilité des terres. In : Rencontres internationales, "Savanes d'Afrique, terres fertiles ?" Montpellier 10-14 décembre 1990, France, IEMVT, 24 p.
- César, J., Ehouinsou, M. & Gouro, A. 2004. Production fourragère en zone tropicale et conseils aux éleveurs. Rapport Procordel, CIRDES, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 47 p.
- Cirad, G. 2002. Mémento de l'agronome. CIRAD-GRET, Ministère des affaires étrangères, Edition Queo, 1692 p.

- Collier, P., et Dercon, S., 2008. African agriculture in 50 years: smallholders in a rapidly changing world? In: ONU (ed.) How to Feed the World in 2050 of the Food and Agriculture. 24-26 june 2009, ONU 13 p.
- Cooper, P. J. M., Dimes, J., Rao, K. P. C., Shapiro, B., Shiferaw, B. & Twomlow, S. J. 2008. Coping better with current climatic variability in the rain-fed farming systems of sub-Saharan Africa: An essential first step in adapting to future climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 126, 24-35.
- Coquillard, P. & Hill, D. 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets, Masson, Paris, France, 275 p.
- Cros, M. J., Duru, M., Garcia, F. & Martin-Clouaire, R. 2001. Simulating rotational grazing management. *Environment International*, 27, 139-145.
- Cros, M. J., Duru, M., Garcia, F. & Martin-Clouaire, R. 2004. Simulating management strategies: the rotational grazing example. *Agricultural Systems*, 80, 23-42.
- Cros, M. J., Garcia, F., Martin-Clouaire, R. & Rellier, J. P. 2006. Modeling and Simulation. In: Munack, A. (ed.) CIGR Handbook of Agricultural Engineering. ASABE, St. Joseph, Michigan, USA, pp 109-124.
- Daalen, J. C. & Shugart, H. H. 1989. OUTENIQUA – A computer model to simulate succession in the mixed evergreen forests of the southern Cape, South Africa. *Landscape Ecology*, 2, 255-267.
- Dakouo, D. 1991. Maintien de la fertilité dans les systèmes de culture en motorisation intermédiaire. Cas de la zone cotonnière ouest du Burkina Faso, Rapport de synthèse INERA, Ouagadougou, Burkina Faso, 49 p.
- Davi, H., Deredec, A. & Martineau, Y. 2003. Modélisation en écologie, Université Paris-Sud, France, 77 p.
- Delpeuch, C. & Vandeplass, A. 2013. Revisiting the “Cotton Problem”—A Comparative Analysis of Cotton Reforms in Sub-Saharan Africa. *World Development*, 42, 209-221.
- Dogliotti, S., García, M.C., Peluffo, S., Dieste, J.P., Pedemonte, A.J., Bacigalupe, G.F., Scarlato, M., Alliaume, F., Alvarez, J., Chiappe, M., Rossing, W.A.H., 2014. Co-innovation of family farm systems: a systems approach to sustainable agriculture. *Agricultural Systems*. 126, 76-86.
- Duke, J. M., Borchers, A. M., Johnston, R. J. & Absetz, S. 2012. Sustainable agricultural management contracts: Using choice experiments to estimate the benefits of land preservation and conservation practices. *Ecological Economics*, 74, 95-103.
- Ezui, G., 2001. Evaluation et adaptation du modèle QUEFTS dans la prédiction du rendement de l'arachide dans les conditions agro-écologiques du Togo : cas typique de Tsagba. Mémoire d'Ingénieur Agronome, UL-ESA, Lomé, Togo, 108 p.
- FAO, 2002. Agriculture, alimentation et nutrition en Afrique. Un ouvrage de référence à l'usage des professeurs d'agriculture, Rome, Italie, 144 p.
- FAO, 2013. The state of food and agriculture, Rome, Italie 114 p.
- Faure, G., Rebuffel, P. & Violas, D. 2011. Une analyse systémique des dispositifs de conseil à l'exploitation familiale en Afrique de l'Ouest. *Cahiers Agricultures*, 20, 394-369.

- Franke, A. C., Berkhout, E. D., Iwuofor, E. N. O., Nziguheba, G., Dercon, G., Vandeplass, I. & Diels, J. 2010. Does crop-livestock integration lead to improved crop production in the savanna of West Africa? *Experimental Agriculture*, 46, 439-455.
- Freschet, G. T., Masse, D., Hien, E., Sall, S. & Chotte, J. L. 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.
- Gaiser, T., Judex, M., Igué, A. M., Paeth, H. & Hiepe, C. 2011. Future productivity of fallow systems in Sub-Saharan Africa: Is the effect of demographic pressure and fallow reduction more significant than climate change ? *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1120-1130.
- Gautier, D., Ankogui-Mpoko, G. F., Renoudji, F., Njoya, A. & Seignobos, C. 2005. Agriculteurs et éleveurs des savanes d'Afrique Centrale: de la co-existence à l'intégration territoriale. *L'Espace Géographique*, 3, 223-236.
- Gerner, H. & Harris, G. 1993. The Use and Supply of Fertilizers in Sub-Saharan Africa. In: Reuter, H. & Prins, H. W. (eds.) *The Role of Plant Nutrient for Sustainable Food Crop Production in Sub-Saharan Africa*. The Dutch Association of Fertilizer Producers, pp. 107-126.
- Gibbons, J. M., Sparkes, D. L., Wilson, P. & Ramsden, S. J. 2005. Modelling optimal strategies for decreasing nitrate loss with variation in weather – a farm-level approach. *Agricultural Systems*, 83, 113-134.
- Harris, F. 2002. Management of manure in farming systems in Semi-Arid West Africa. *Experimental Agriculture*, 38, 131-148.
- Hélias, A., Guerrin, F. & Steyer, J.-P. 2008. Using timed automata and model-checking to simulate material flow in agricultural production systems—Application to animal waste management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63, 183-192.
- 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.
- Hien, V., Sédogo, P. M. & Lompo, F. 1994. Gestion de la fertilité des sols au Burkina Faso. Bilan et perspectives pour la promotion de systèmes agricoles durables dans la zone soudano-sahélienne, pp 47-59.
- Hilimire, K. 2011. Integrated Crop/Livestock Agriculture in the United States: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 35, 376-393.
- Hillebrand, W. F., Lundell, G. E. F., Bright, H. A. & Hoffman, J. I. 1953. *Applied inorganic analysis*, ed. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 1034 p.
- Hostiou, N. & Dedieu, B. 2009. Diversity of forage system work and adoption of intensive techniques in dairy cattle farms of Amazonia. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 535-544.
- Houba, V. J. G. – Huijbregts, A. W. M. – Wilting, P. – Novozamsky, I. – Gort, G.: 1995. Sugar yield, nitrogen uptake by sugar beet and optimal nitrogen fertilization in relation to nitrogen soil analyses and several additional factors. *Biol. Fertil. Soils*, 19: 1. 55-59.

- Houba, V. J. G., Van Der Lee, J. J. & Novozamsky, I. 1995. Soil analysis procedures, other procedures. Soil and plant analysis, part 5 B. Syllabus' 1995, pp 76-79.
- Ingram, K. T., Roncoli, M. C. & Kirshen, P. H. 2002. Opportunities and constraints for farmers of west Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural Systems*, 74, 331-349.
- INSD. 2009. Recensement général de la population et de l'habitation (RGPH) de 2006. Institut National de la Statistique et de la Démographie, Ouagadougou, Burkina Faso, 180 p.
- Janssen, S. & van Ittersum, M. K. 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*, 94, 622-636.
- Janssen, W. 1993. Labor and Rainfed Agriculture in West Asia and North Africa. *Experimental Agriculture*, 29, 387-388.
- Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J. N. G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J. P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K. L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R. L., Freebairn, D. M. & Smith, C. J. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18, 267-288.
- Keating, B. A. & McCown, R. L. 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems*, 70, 555-579.
- Kelly, V., Adesina, A. A. & Gordon, A. 2003. Expanding access to agricultural inputs in Africa: a review of recent market development experience. *Food Policy*, 28, 379-404.
- Kerr, D. V., Chaseling, J., Chopping, G. D. & Cowan, R. T. 1999. DAIRYPRO—a knowledge-based decision support system for strategic planning on sub-tropical dairy farms. II. Validation. *Agricultural Systems*, 59, 257-266.
- Kokou, K. D. 2007. Capacités d'ajustement des exploitations agricoles aux processus de libéralisation de la filière cotonnière au Togo. PhD, Université de Groningen, Pays-Bas, 374 p.
- Koulibaly, B., Traoré, O., Dakuo, D. & Zombré, P. N. 2009. Etude de l'effet des apports d'amendements sur les propriétés d'un sol ferrugineux tropical en culture continue dans l'ouest du Burkina Faso. *Etudes et Recherches Sahéliennes*, 14-15, 162-173.
- Koulibaly, B., Traoré, O., Dakuo, D., Zombré, P. N. & Bondé, D. 2010. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les rendements et les bilans culturaux d'une rotation cotonnier-maïs-sorgho au Burkina Faso. *Tropicultura*, 3, 184-189.
- Le Gal, P.-Y., Bernard, J. & Moulin, C.-H. 2013. Supporting strategic thinking of smallholder dairy farmers using a whole farm simulation tool. *Tropical Animal Health and Production*, 45, 1119-1129.
- Le Gal, P. Y., Dugué, P., Faure, G. & Novak, S. 2011. How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. *Agricultural Systems*, 104, 714-728.
- Le Gal, P. Y., Mérot, A., Moulin, C. H., Navarrete, M. & Wery, J. 2010. A modelling framework to support farmers in designing innovative agricultural production systems. *Environmental Modelling and Software*, 25, 258-268.
- Lisson, S., MacLeod, N., McDonald, C., Corfield, J., Pengelly, B., Wirajaswadi, L., Rahman, R., Bahar, S., Padjung, R., Razak, N., Puspad, K., Dahlanuddin, Sutaryono, Y.,

- Saenong, S., Panjaitan, T., Hadiawati, L., Ash, A. & Brennan, L. 2010. A participatory farming systems approach to improving Bali cattle production in the smallholder crop–livestock systems of Eastern Indonesia. *Agricultural Systems*, 103, 486-497.
- Lompo, F., Bonzi, M., Bado, B. V., Gnankambary, Z., Ouandaogo, N., Sedogo, M. P. & Assa, A. 2007. Influence à long terme des modes de gestion de la fertilité sur les états, les formes, les fractions et le bilan du phosphore d'un lixisol du Burkina en culture continue de sorgho. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 2, 175-184.
- Lompo, F., Segda, Z., Gnankambary, Z. & Ouandaogo, N. 2009. Influence des phosphates naturels sur la qualité et la biodégradation d'un compost de pailles de maïs. *Tropicultura*, 27, 105-109.
- Manlay, R. J., Ickowicz, A., Masse, D., Feller, C. & Richard, D. 2004. 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.
- Martin, G., Duru, M., Schellberg, J. & Ewert, F. 2012. Simulations of plant productivity are affected by modelling approaches of farm management. *Agricultural Systems*, 109, 25-34.
- Martin, G., Martin-Clouaire, R. & Duru, M. 2013. Farming system design to feed the changing world. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 131-149.
- Matthews, R., Stephens, W., Hess, T., Mason, T. and Graves, A. 2000. Applications of crop/soil simulation models in developing countries. Final Technical Report for PD082. Silsoe: Cranfield, Silsoe University, 172 pp
- McCown, R. L., Carberry, P. S., Hochman, Z., Dalgliesh, N. P. & Foale, M. A. 2009. Re-inventing model-based decision support with Australian dryland farmers. 1. Changing intervention concepts during 17 years of action research. *Crop and Pasture Science*, 60, 1017-1030.
- McLean, E. O. 1982. Soil pH and lime requirement. In Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Keeney (eds.) *Methods of soil analysis. Part 2 - Chemical and microbiological properties.* (2nd Ed.). *Agronomy* 9, 199-223.
- Mohamed Saleem, M. A. 1998. Nutrient balance patterns in African livestock systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 71, 241-254.
- Morton, J. F. 2007. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 19680-19685.
- Moumouni, I. M., Vodouhe, S. D. & Streiffeler, F. 2009. What Makes Small-Scale Farmers Participate in Financing Agricultural Research and Extension? Analysis of Three Case Studies from Benin. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 15, 301-316.
- Muchagata, M. & Brown, K. 2003. Cows, colonists and trees: rethinking cattle and environmental degradation in Brazilian Amazonia. *Agricultural Systems*, 76, 797-816.
- Nianogo, A. J., Soma, L., Bonkougou, G. F. X., Nassa, S. & S.J., Z. 1995. Utilisation optimale de la graine de coton et des fourrages locaux pour l'engraissement des ovins Djallonké type Mossi. *Revue Ressources Améliorées Production Agricole du Milieu aride*, 7, 179-195.

- Okike, I., Jabbar, M. A., Manyong, V. M. & Smith, J. W. 2005. Ecological and socio-economic factors affecting agricultural intensification in the West African Savannas: Evidence from Northern Nigeria. *Journal of Sustainable Agriculture*, 27, 5-37.
- Ouédraogo, E., Mando, A. & Stroosnijder, L. 2006. Effects of tillage, organic resources and nitrogen fertiliser on soil carbon dynamics and crop nitrogen uptake in semi-arid West Africa. *Soil and Tillage Research*, 57-67.
- Ouédraogo, E., Mando, A. & Zombré, N. P. 2001. Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 84, 259-266.
- Ouedraogo, S. 2005. Intensification de l'agriculture dans le Plateau central du Burkina Faso : une analyse des possibilités à partir des nouvelles technologies. Thèse de doctorat, Université de Groningen, Pays-Bas, 336 p.
- Pallo, F. J. P. & Thiombiano, L. 1989. Les sols ferrugineux tropicaux lessives à concrétions du Burkina Faso : Caractéristiques et contraintes pour l'utilisation agricole. SOLTROP 89, 307-327.
- Penning de Vries, F. W. T. & Rabbinge, R. 1995. Le rôle des modèles dans la recherche, dans l'enseignement et dans la planification. In: Les modèles de simulation de la croissance végétale comme outils de recherche développement. Actes de colloque, Bamako, Mali, du 7 au 8 Novembre 1994, pp 5-22.
- Pieri, C. 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara, CIRAD, Montpellier, France, 444 p.
- Pouya, M. B., Bonzi, M., Gnankambary, Z., Traore, K., Ouedraogo, J. S., Some, A. N. & Sedogo, M. P. 2013. Pratiques actuelles de gestion de la fertilité des sols et leurs effets sur la production du cotonnier et sur le sol dans les exploitations cotonnières du Centre et de l'Ouest du Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, 11 p.
- Pretty, J., Toulmin, C. & Williams, S. 2011. Sustainable intensification in African agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 9, 5-24.
- Reij, C. P. & Smaling, E. M. A. 2008. Analyzing successes in agriculture and land management in Sub-Saharan Africa: Is macro-level gloom obscuring positive micro-level change? *Land Use Policy*, 25, 410-420.
- Rellier, J. P. 2005. DIESE : un outil de modélisation et de simulation de systèmes d'intérêt agronomique, INRA, Paris, France, 28 p.
- Romera, A. J., Beukes, P., Clark, C., Clark, D., Levy, H. & Tait, A. 2010. Use of a pasture growth model to estimate herbage mass at a paddock scale and assist management on dairy farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74, 66-72.
- Romera, A. J., Morris, S. T., Hodgson, J., Stirling, W. D. & Woodward, S. J. R. 2004. A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 42, 67-86.
- Rossing, W. A. H., Zander, P., Josien, E., Groot, J. C. J., Meyer, B. C. & Knierim, A. 2007. Integrative modelling approaches for analysis of impact of multifunctional agriculture: A review for France, Germany and The Netherlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120, 41-57.



- Salassi, M. E., Deliberto, M. A. & Guidry, K. M. 2013. Economically optimal crop sequences using risk-adjusted network flows: Modeling cotton crop rotations in the southeastern United States. *Agricultural Systems*, 118, 33-40.
- Savadogo, M. 2000. Crop residue management in relation to sustainable land use. A case study in Burkina Faso. PhD thesis, University, Wageningen, The Netherlands, 159 p.
- Schaller N., 2008. Analyse et modélisation des relations agriculture – élevage au sein d’exploitations cotonnières dans l’Ouest du Burkina-Faso. Mémoire d’ingénieur agronome. AgroParisTech, France, 108 p.
- Schlecht, E. & Buerkert, A. 2004. Organic inputs and farmers' management strategies in millet fields of western Niger. *Geoderma*, 121, 271-289.
- Schlenker, W. & Lobell, D. B. 2010. Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environ. Res. Lett.*, 5, 8 p.
- Sédogo, M. P. 1993. Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de Doctorat d’Etat es Sciences Naturelles, Université Nationale de Côte d’Ivoire, 345 p.
- Sédogo, M. P. 2008. Etude sur la capitalisation des technologies en matière d’amélioration de la fertilité des sols dans les zones cotonnières du Burkina Faso. Rapport INERA, Burkina Faso, 51 p.
- Segda, Z., Hien, V., Lompo, F. & M., B. 1996. Gestion améliorée de la jachère par l’utilisation de légumineuses de couverture, IRD, 12 p.
- Sempore, A. W., Andrieu, N. & Bayala, I. 2011. Coconception d’innovations agropastorales assistée par un modèle à l’échelle de l’exploitation. Cas de l’embouche bovine. *Revue d’élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 1-4, 51-60.
- Sere, C. & Steinfeld, H. 1996. World livestock production systems: current status, issues and trends. *Animal Production and Health Paper*, 127, 48 p.
- Séréme, A. & May, P. 2008. Valorisation agricole des ordures ménagères en zone soudano-sahélienne : cas de la ville de Bobo-Dioulasso. *Journal Sciences*, 8, 28-36.
- Sinclair, T. R. & Seligman, N. G. 1996. Crop modeling : from infancy to maturity. *Agronomy Journal*, 5, 698-703.
- Smaling, E. M. A. & Dixon, J. 2006. Adding a soil fertility dimension to the global farming systems approach, with cases from Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 116, 15-26.
- Snow, V. O. & Lovatt, S. J. 2008. A general planner for agro-ecosystem models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60, 201-211.
- Soltner, D. 2005. Les bases de la production végétale. In: Collection Sciences et techniques Agricoles. (ed.) Le sol et son amélioration, France, 471 p.
- Some, L. 1989. Diagnostic agroclimatique du risque de sécheresse au Burkina Faso. Etude de quelques techniques agronomiques améliorent la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs. PhD, Université de Montpellier II, France, 321p.
- Sørensen, C. G., Madsen, N. A. & Jacobsen, B. H. 2005. Organic Farming Scenarios: Operational Analysis and Costs of implementing Innovative Technologies. *Biosystems Engineering*, 91, 127-137.

- Sterk, B., van Ittersum, M. K. & Leeuwis, C. 2011. How, when, and for what reasons does land use modelling contribute to societal problem solving? *Environmental Modelling & Software*, 26, 310-316.
- Sterk, B., van Ittersum, M. K., Leeuwis, C., Rossing, W. A. H., van Keulen, H. & van de Ven, G. W. J. 2006. Finding niches for whole-farm design models-contradiction in terminis? *Agricultural Systems*, 87, 211-228.
- Timah, E. A., Ajaga, N., Tita, D. F., Ntonga, L. M. & Bongsiysi, I. B. 2008. Demographic pressure and natural resources conservation. *Ecological Economics*, 64, 475-483.
- Tini, A. 2003. La gestion des déchets solides ménagers à Niamey au Niger : Essai pour une stratégie de gestion durable. Thèse de doctorat, INSA, France, 302 p.
- Tittonell, P., Leffelaar, P. A., Vanlauwe, B., van Wijk, M. T. & Giller, K. E. 2006. Exploring diversity of crop and soil management within smallholder African farms: A dynamic model for simulation of N balances and use efficiencies at field scale. *Agricultural Systems*, 91, 71-101.
- Tittonell, P., van Wijk, M. T., Herrero, M., Rufino, M. C., de Ridder, N. & Giller, K. E. 2009. Beyond resource constraints – Exploring the biophysical feasibility of options for the intensification of smallholder crop-livestock systems in Vihiga district, Kenya. *Agricultural Systems*, 101, 1-19.
- Toillier, A. 2012. Quel accompagnement des acteurs ruraux pour une intensification écologique?, DP Asap, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 9 p.
- Traore, O., Traore, K., Bado, B. V. & Lompo, D. J. P. 2007. Crop rotation and soil amendments: impacts on cotton and maize production in a cotton-based system in western Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 1, 143-150.
- Vall, E. & Diallo, M. A. 2009. Savoirs techniques locaux et pratiques : la conduite des troupeaux aux pâturages (Ouest du Burkina Faso). *Natures Sciences Sociétés*, 17, 122-135.
- Vall, E., Dugué, P. & Blanchard, M. 2006. Le tissage des relations agriculture-élevage au fil du coton. *Cahiers Agricultures*, 15, 72-79.
- Vall, E., Lhoste, P., Abakar, O. & Dongmo Ngoutsop, A. L. 2003. La traction animale dans le contexte en mutation de l'Afrique subsaharienne : enjeux de développement et de recherche. *Cahiers Agricultures*, 12, 219-226.
- van de Ven, G. W. J. & van Keulen, H. 2007. A mathematical approach to comparing environmental and economic goals in dairy farming: Identifying strategic development options. *Agricultural Systems*, 94, 231-246.
- Van Ittersum, M. K. & Donatelli, M. 2003. Modelling cropping systems. Highlights of the symposium and preface to the special issues. *European Journal of Agronomy*, 18, 187-197.
- van Wijk, M. T., Tittonell, P., Rufino, M. C., Herrero, M., Pacini, C., de Ridder, N. & 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.
- Vayssières, J., Bocquier, F. & Lecomte, P. 2009. 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., 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*, 716-733.
- Vayssières, J., Vigne, M., Alary, V. & Lecomte, P. 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agricultural Systems*, 104, 146-161.
- Voinov, A. & Bousquet, F. 2010. Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling & Software*, 25, 1268-1281.
- Waithaka, M. M., Thornton, P. K., Herrero, M. & Shepherd, K. D. 2006. Bio-economic evaluation of farmers' perceptions of viable farms in western Kenya. *Agricultural Systems*, 90, 243-271.
- Walkley A., Black J. A., 1934. An examination of the Detjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromatic acid titration method. *Soil Science* 37, 29-38.
- Woodward, S. J. R., Romera, A. J., Beskow, W. B. & Lovatt, S. J. 2008. Better simulation modelling to support farming systems innovation: Review and synthesis. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51, 235-252.
- Zingore, S., González-Estrada, E., Delve, R. J., Herrero, M., Dimes, J. P. & Giller, K. E. 2009. An integrated evaluation of strategies for enhancing productivity and profitability of resource-constrained smallholder farms in Zimbabwe. *Agricultural Systems*, 101, 57-68.
- Zingore, S., Murwira, H. K., Delve, R. J. & Giller, K. E. 2007. Soil type, management history and current resource allocation: Three dimensions regulating variability in crop productivity on African smallholder farms. *Field Crops Research*, 101, 296-305.
- Zongo, B. 2010. Intérêt de la programmation linéaire pour l'analyse des pratiques des producteurs et la conception des innovations : cas des villages de Koumbia et Kourouma à l'Ouest du Burkina Faso. Mémoire de DEA, IDR/UPB, Burkina Faso, 149p.

# Annexes

# Annexe 1 : Liste des travaux scientifiques réalisés

## Articles publiés

**Sempore A.W.**, Andrieu N., Le Gal P.Y., Nacro H.B., Sedogo M., 2016. Supporting better crop-livestock integration on small-scale West African farms : A simulation-based approach. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40 : 1, 3-23.

**Sempore A.W.**, Andrieu N., Nacro H.B., Sedogo M., Le Gal P.Y., 2015. Relevancy and role of whole-farm simulation tools in supporting smallholder farmers for planning their agricultural season. *Environmental Modelling & Software*, 68:147-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.015>.

**Sempore A.W.**, Andrieu N., Bayala I., 2011. Co-conception d'innovations agropastorales assistée par un modèle à l'échelle de l'exploitation - Cas de l'embouche bovine. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 64 (1-4): 51-60.

## Articles soumis

**Sempore A.W.**, Andrieu N., Le Gal P.Y., Nacro H.B., Sedogo M., 2015. Pratiques actuelles et fertilité chimique des sols dans les exploitations de l'Ouest du Burkina Faso : Cas des villages de Koumbia et Waly. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* (submitted).

## Autres publications

Andrieu N., **Sempore A.W.**, 2014. Un exemple d'objet intermédiaire en lien avec le caractère familial de l'exploitation : le modèle Cikedà. In "Agriculture familiales et mondes à venir". Editions Quae, 239-255.

Andrieu N., Dugué P., Le Gal P.-Y., Rueff M., Schaller N., **Sempore A.W.**, 2012. Validating a whole farm modelling with stakeholders: Evidence from a West African case. *Journal of Agricultural Science*, 4(9), 159-173.

### Articles en preparation

**Sempore A.W.**, Andrieu N., Nacro H.B., Sedogo M., Le Gal P.Y., 2014. Combined use of three whole farm simulation tools for designing innovative production strategies with crop-livestock farmers in Burkina-Faso

### Communications

**Sempore A.W.**, Andrieu N., Le Gal P.Y., Nacro H.B., Vall E., Sedogo M., 2013. Quelles stratégies pour améliorer l'intégration agriculture-élevage dans des exploitations de savane ouest-africaine ? Approches par simulation avec les producteurs. Conférence AGRAR – 2013. Yamoussokro (Côte d'Ivoire) du 04 au 06 juin 2013. 18 p.

**Sempore A.W.**, Andrieu N., Nacro H.B., Sedogo M., Le Gal P.Y., 2014. Combined use of three whole farm simulation tools for designing innovative production strategies with crop-livestock farmers in Burkina-Faso. 64th Annual Meeting of the EAAP, "*LFS innovations for local/rural development*", Nantes, 26-30 August 2013.

**Sempore A.W.**, Andrieu N., Le Gal P.Y., Nacro H.B., Vall E., Sedogo M., 2011. Le modèle Cikeda : conception de stratégies de gestion de la fumure organique. Séminaire DP ASAP « Partenariat, Modélisation, Expérimentation : Quelles leçons pour la conception de l'innovation & l'intensification écologique », du 15 au 17 novembre 2011, Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), 13 p.

**Sempore A.W.**, Andrieu N., Chia E., Dugue P., Le Gal P.Y., Ouedraogo M., Sankara S., Vall E., 2011. Analyse croisée de l'impact d'innovations à partir de trois modèles d'exploitations en zone de savane de l'Ouest du Burkina Faso. Atelier CORUS et AIRES SUD « Agronomie et écosystème », du 21 au 25 mars 2011, Antananarivo (Madagascar), 8 p.

**Sempore A.W.**, Andrieu N., SEDOGO P.M., 2010. Validation d'un modèle de simulation du fonctionnement de l'exploitation coton-céréales-élevage dans l'Ouest du Burkina Faso. Colloque international CEDRES « Quelle agriculture pour un développement durable en Afrique ? », du 06 au 08 décembre 2010, Ouagadougou (Burkina Faso), 17 p.

Annexe 2 : Historique des modes de pratique des différentes parcelles de la zone d'étude

Producteurs	A1C	A2C	A3S	A4S	A5O	A6O	AE1C	AE2C	AE3S	AE4S	AE5O	AE6O	E1C	E2C	E3S	E4S	E5O	E6O	
Pré Culture	C	-	-	C	C	-	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-	C	-
Sup (ha)	5	-	-	2,5	3	-	5,5	7,5	7,5	10,5	5	7	12	3	-	-	-	4	-
Texture	SG			A	S		S	SA	SA	A	SG	SG	A	A				S	
FO 2009 (t)	P	-	-	0	0	-	15	0	0	0	0	2	P	0	-	-	-	P	-
FO 2010 (t)	P	-	-	1,5	0	-	0	0	0	0	0	0	P	2	-	-	-	P	-
FO 2011 (t)	P	-	-	1,2	0	-	0	0	0	0	0,8	P	0	-	-	-	-	P	-
NPK (kg/ha)	100	-	-	100	150	-	150	150	150	150	100	100	150	-	-	-	-	150	-
Urée (kg/ha)	50	-	-	50	50	-	50	50	50	50	50	50	50	-	-	-	-	50	-
<b>Précédent maïs</b>																			
Pré Culture	M	M	M	M	M	M	M	-	M	-	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Sup (ha)	2,5	2,5	1,5	2	3,5	0,5	7	-	7	-	4	3	12	2	4	1	1,5	1,5	2,25
Texture	SG	S	S	SG	S	A	SA		S		SG	SA	A	SA	S	S	SA	S	SG
FO 2009 (t)	P	0	0	J	0	3	0	-	10	-	P	0,5	0	3	P	P	J	P	P
FO 2010 (t)	P	0	10,5	J	0	0	0	-	0	-	P	0,5	0	1	0	P	J	P	P
FO 2011 (t)	5,2	1,2	0	0	0	3	0	-	0	-	P	0,5	0	3	P	P	0	P	P
NPK (kg/ha)	150	100	150	100	150	150	150	-	150	-	150	150	100	150	50	50	0	50	100
Urée (kg/ha)	50	50	50	50	50	50	50	-	50	-	50	50	50	50	0	25	0	25	50
<b>Précédent sorgho</b>																			
Pré Culture	-	So	So	-	-	So	-	-	-	-	So	So	-	So	So	-	-	So	-
Sup (ha)	-	1,5	0,75	-	-	0,75	-	-	-	-	1	7	-	2,5	1,5	-	-	1	0,5
Texture		S	S			A					SG	A		S	S			S	S
FO 2009 (t)	-	0	0	-	-	0	-	-	-	-	0	0	-	0	0	-	-	0	0
FO 2010 (t)	-	1,5	0	-	-	2	-	-	-	-	0	0	-	P	0	-	-	0	0
FO 2011 (t)	-	0	0	-	-	0	-	-	-	-	0	0	-	0	0	-	-	0	0
NPK (kg/ha)	-	0	0	-	-	0	-	-	-	-	0	0	-	0	0	-	-	0	0
Urée (kg/ha)	-	0	0	-	-	0	-	-	-	-	0	0	-	0	0	-	-	0	0

**Pré Culture** : précédent cultural ; **Sup** : superficie ; **FO** : fumure organique ; **C** : coton ; **M** : maïs ; **S** : sorgho ; **P** : parcentage ; **J** : jachère