

BURKINA FASO
UNITE-PROGRES-JUSTICE

MINISTERE DES ENSEIGNEMENTS SECONDAIRE,
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE BOBO-DIOULASSO

INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

en vue de l'obtention du

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES (DEA)

**OPTION : Gestion Intégrée des Ressources Naturelles/ Système de Production
Végétale/ Sciences du Sol**

Thème :

***Validation d'un modèle de simulation du fonctionnement de
l'exploitation coton-céréales-élevage dans l'Ouest du Burkina Faso***

Présenté par :

SEMPORE Aristide Wendyam

Maître de stage : Dr Nadine ANDRIEU, Agronome Modélisatrice, Chercheur au CIRDES
Bobo-Dioulasso

Président du jury

Pr Michel P. SEDOGO, Chercheur à l'INERA Kamboinsin (Ouagadougou), **Directeur de
mémoire**

Membres

Pr Théodore TAPSOBA, Premier vice Président de l'Université Polytechnique de Bobo-
Dioulasso

Dr Zacharie SEGDA, Directeur Général de la Maîtrise d'Ouvrage de Bagré (MOB)

JUIN 2010

TABLE DES MATIERES

Remerciements	ii
Sigles et abréviations.....	iii
Liste des illustrations	iv
Résumé	v
Introduction.....	1
1.Synthèse bibliographique	3
1.1. Approches conceptuelles de la modélisation.....	3
1.2. Analyse de la sensibilité	4
1.3. Concepts de la validation des modèles.....	5
2.Matériel et méthodes.....	6
2.1. Zone d'étude.....	6
2.2. Le modèle.....	7
2.2.1. <i>Présentation du modèle</i>	7
2.2.2. <i>Les différentes simplifications</i>	9
2.3. Collecte et analyse des données	10
2.3.1. <i>Analyse de la sensibilité</i>	10
2.3.2. <i>Validation du modèle</i>	13
3.Résultats et discussion	16
3.1. Analyse de la sensibilité du modèle	16
3.1.1. <i>Sensibilité de la sortie « bilan en N sur le maïs »</i>	16
3.1.2. <i>Sensibilité des sorties « bilan en N, P, K sur coton, en P sur maïs et en N sur sorgho » par rapport aux entrées quantités de N, P, K apportées</i>	17
3.1.3. <i>Sensibilité de la sortie « bilan en UF pour le nombre d'animaux choisi et pour la saison sèche chaude »</i>	18
3.1.4. <i>Sensibilité de la sortie « bilan en MAD pour le nombre d'animaux choisi et pour la saison sèche chaude »</i>	19
3.1.5. <i>Sensibilité de la sortie nombre de sacs de tourteaux de coton à acheter et dose de tourteau à distribuer par jour pendant la saison sèche chaude</i>	20
3.1.6. <i>Sensibilité de la sortie bilan céréalier</i>	22
3.1.7. <i>Conclusion partielle</i>	22
3.2. Validation du modèle	22
3.2.1. <i>Validation du module système de culture</i>	22
3.2.2. <i>Validation du module fertilisation</i>	26
3.2.3. <i>Validation du module économique (charges liées à l'agriculture)</i>	30
3.3. Discussion générale.....	32
3.3.1. <i>Sensibilité du modèle</i>	32
3.3.2. <i>Validation</i>	33
Conclusion.....	35
Références Bibliographiques.....	37
Annexes	i

REMERCIEMENTS

La réalisation du présent mémoire a été rendue possible grâce à la contribution de nombreuses personnes. Il nous est très agréable de leur témoigner notre reconnaissance et leur adresser nos sincères remerciements.

Nos remerciements s'adressent particulièrement :

- au Professeur Michel P. SEDOGO, Chercheur à l'Institut de l'Environnement et de Recherche Agricole de Kamboinsin, notre directeur de mémoire pour sa totale disponibilité, son soutien et ses suggestions lors de ce stage ;
- au Professeur Abdoulaye S. GOURO, Directeur Général du Centre International de Recherche-Développement sur l'Elevage en zone Sub-humide (CIRDES) pour l'accueil au sein de sa structure ;
- au Dr. Nadine ANDRIEU, Chercheur agronome modélisatrice au CIRAD mise à la disposition du CIRDES, notre maître de stage, pour son excellent suivi et sa constante disponibilité au cours des travaux de terrain et la rédaction de ce mémoire. Qu'elle trouve en ce travail le fruit de son inestimable encadrement ;
- au Dr. Augustin B. KANWE, Chef de l'URPAN, pour ses encouragements et ses conseils ;
- au Dr Bernard BACYE (Enseignant-Chercheur à l'IDR/UPB) et au Dr. Eric VALL (Chercheur zootechnicien au CIRAD mis à la disposition du CIRDES) pour avoir lu la version provisoire du présent mémoire tout en l'accompagnant de critiques pertinentes ;
- à M. Innocent BAYALA technicien au CIRDES pour son aide constante et échanges constructifs durant le stage ;
- au corps professoral de l'IDR, pour l'inestimable contribution à notre formation académique ;
- au personnel du CIRDES, pour sa franche coopération durant le stage ;
- aux guides (Ousmane, Harouna) et producteurs des villages de Koumbia, Kourouma pour leurs aides précieuses et pour nous avoir permis de travailler dans leurs exploitations ;
- aux familles SEMPORE et BERE, pour leurs encouragements et soutien de tout genre ;
- aux étudiants stagiaires du CIRDES pour leur sympathie, leur esprit d'ouverture et leur collaboration ;
- aux étudiants en DEA plus précisément ceux de l'option GIRN de l'année universitaire 2008 – 2009, pour leur esprit fraternel ;
- aux amis, pour les encouragements, le soutien et les moments forts passés ensemble.

Enfin à tous ceux dont les noms n'apparaissent pas ici. Je leur exprime ma plus grande reconnaissance.

SIGLES ET ABREVIATIONS

AS : Analyse de sensibilité

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

CORUS : Coopération pour la recherche universitaire et scientifique

CRM : coefficient de masse résiduel

EF : Efficience

GIRN : Gestion Intégrée des Ressources Naturelles

GRN-SP : Gestion des Ressources Naturelle/ Système de production

ha : hectare

IDR/UPB : Institut du Développement Rural /Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

IRENE: Integrated Ressources For Evaluating Numerical Estimates.

kg: kilogramme

MAD : Matière azotée digestive

OAT: One-Factor-At-A-Time

PR : Petit ruminant

r : coefficient de corrélation

RMSE : Root mean square error

SD: Screening Designs

SOFITEX : Société des fibres et textiles

UBT : Unité Bovin Tropical

UF : Unité fourragère

URPAN : Unité de Recherche sur les Productions Animales

VL : Vache laitière

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Liste des tableaux

Tableau I : Variables d'entrées et valeurs considérées lors de l'AS	11
Tableau II : Sorties concernées par l'AS	12
Tableau III : Protocole de collecte des données.....	13
Tableau IV : Nombre de parcelles par culture pour chaque village.....	14
Tableau V : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes productions en grain (Koumbia)	23
Tableau VI : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes productions en paille/fanes (Koumbia)	24
Tableau VII : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes productions en grain (Kourouma).....	25
Tableau VIII : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes productions en paille/fanes (Kourouma).....	25
Tableau IX : Apports moyens simulés et mesurés d'éléments fertilisants (Koumbia).....	27
Tableau X : Apports moyens simulés et mesurés d'éléments fertilisants (Kourouma).....	27
Tableau XI : Valeurs des indices statistiques calculés pour les différents bilans minéraux (Koumbia)	29
Tableau XII : valeurs des indices statistiques calculés pour les différents bilans minéraux (Kourouma)	29
Tableau XIII : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes charges économiques liées à l'agriculture (Koumbia)	31
Tableau XIV : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes charges économiques liées à l'agriculture (Kourouma)	31

Liste des figures

Figure 1 : Canevas général d'évolution d'un modèle de simulation et son domaine d'application (Savary, 1994).....	4
Figure 2 : localisation des deux villages (Andrieu et <i>al.</i> , 2009)	6
Figure 3 : Pluviométrie mensuelle (mm) de 2009 enregistrée à Koumbia et à Kourouma.....	7
Figure 4 : Modèle conceptuel utilisé pour implémenter le simulateur Excel (Andrieu et <i>al.</i> , 2009)	8
Figure 5 : Interfaces du simulateur	9
Figure 6. Pourcentage de variation de la sortie bilan en N sur maïs par rapport aux entrées (A). IS de la sortie bilan en N sur maïs par rapport aux entrées (B).....	16
Figure 7. Pourcentage de variation (A) et IS (B) des sorties bilan en N, P, K sur coton, en P sur maïs et en N sur sorgho par rapport aux entrées	18
Figure 8. Pourcentage de variation de la sortie bilan en UF par rapport aux entrées (A). IS de la sortie bilan en UF par rapport aux entrées (B).....	19
Figure 9. Pourcentage de variation de la sortie bilan en MAD par rapport aux entrées (A). IS de la sortie bilan en MAD par rapport aux entrées (B).....	20
Figure 10. Pourcentage de variation (A) et IS (B) de la sortie nombre de sacs de tourteaux de coton à acheter et dose de tourteaux à distribuer par rapport aux entrées.	21

RESUME

Un modèle de simulation du fonctionnement d'exploitations a été élaboré sous Excel par le projet Corus dans la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso afin d'aider les producteurs dans la planification agricole. L'étude a consisté à la validation de cet outil de simulation.

Pour ce faire, une analyse de la sensibilité du modèle par rapport aux données d'entrées a été effectuée par l'approche One-Factor-At-A-Time (OAT) avec les données provenant d'une exploitation à Kourouma. Cette méthode consiste à modifier chaque entrée du modèle par -10 % et + 10 % par rapport à sa valeur initiale. Par ailleurs, 26 exploitations ont été échantillonnées au niveau de la zone cotonnière (14 à Koumbia et 12 à Kourouma). Des séries d'analyses de sols, de fumure organique et des mesures de production agricole (coton, maïs, sorgho et niébé) ont été effectuées sur les parcelles de ces exploitations. Les données de terrains ont fait l'objet d'une comparaison avec les sorties du modèle.

L'analyse de la sensibilité du modèle a révélé que 26 % des entrées parmi les 39 testées engendrent des variations significativement au niveau des sorties concernées lorsqu'elles subissent des variations de + ou - 10 %.

L'analyse statistique a montré que les différences entre les productions agricoles simulées et mesurées, entre les apports de fumure organique virtuels et réels et entre les bilans minéraux simulés et mesurés sur le terrain sont importantes. Cette différence n'a pas été significative entre les charges virtuelles et réelles liées à l'agriculture. La différence entre les valeurs simulées et celles mesurées s'explique vraisemblablement par la non prise en compte de certains facteurs influant sur la production de biomasse (fertilisation notamment) ou sur les importations et exportations de nutriments, de même qu'un possible problème de paramétrage du modèle. Cette analyse permet donc de proposer des modifications pour corriger ces écarts. Ainsi la structuration du module système de culture en trois systèmes de culture (système traditionnel, semi-intensif et intensif) permettra d'améliorer les sorties de ce module. Aussi, la modification des termes « quantité de fumure organique/ éléments minéraux apportée aux cultures » du modèle par les termes « quantité potentielle de fumure organique/ éléments minéraux pouvant être apportée aux cultures » ainsi que la seule représentation du caractère négatif ou positif des bilans minéraux par des signes « - et + » pourront éviter les erreurs d'interprétation des sorties. Une sensibilisation s'impose aux futurs utilisateurs du modèle afin de pouvoir bien analyser les sorties lors des différentes simulations avec les producteurs.

Mots clés : modèle de simulation, analyse de sensibilité, validation, exploitation, zone cotonnière

Introduction

L'agriculture des pays d'Afrique Subsaharienne est caractérisée par sa faible productivité. Au Burkina Faso, les faibles rendements des cultures sont souvent expliqués par les conditions pluviométriques défavorables, la pauvreté naturelle des sols en éléments nutritifs et la faible utilisation des engrais (Sedogo, 1993 ; Bado *et al.*, 1997a et 2000). Les engrais minéraux sont très peu utilisés surtout à cause de leurs coûts élevés comparativement aux faibles revenus des producteurs (N'Diaye *et al.*, 1999). L'utilisation des engrais organiques est également faible car l'agriculture n'est pas systématiquement intégrée à l'élevage. La baisse de la pluviosité et la variabilité climatique rendent très aléatoires la productivité végétale et animale.

Parallèlement, la forte croissance démographique des dernières années a entraîné une forte pression sur les ressources en terres cultivables et pastorales (Lhoste, 1988 ; INERA/CIRDES, 1997). L'augmentation de la population est accompagnée de celle du cheptel entraînant du même coup un accroissement de la demande en produits végétaux utiles à l'homme et à l'animal. Cette forte pression sur le couvert végétal influence la capacité des sols à produire la biomasse nécessaire aux besoins croissants des populations humaine et animale. La jachère qui était le moyen traditionnel de restauration de la fertilité des sols est de moins en moins pratiquée à cause de la forte demande en terres cultivables (Boyer, 1982 ; Bacye, 1993 et Pieri, 1989). On assiste alors à de nombreux conflits entre les éleveurs en quête de pâturages pour leurs troupeaux et les agriculteurs en quête de terres cultivables.

Face à une telle situation, couplée à l'instabilité de l'environnement économique (hausse du prix des intrants, baisse du prix du coton), il devient urgent de repenser les modes de gestion des exploitations. C'est dans ce contexte qu'un modèle de simulation simple a été mis en place par le projet Corus « *Rôle de la modélisation pour la gestion durable des systèmes de production coton-céréales-élevage en Afrique de l'Ouest* ». Ce modèle simule la production animale et végétale de l'exploitation en tenant compte des règles de décision du producteur afin d'aider à la conception d'innovations techniques et organisationnelles (Andrieu *et al.*, 2009). Selon Dzotsi (2002), pour qu'un modèle soit adopté par un praticien, il doit répondre aux attentes de ce dernier et faire l'objet d'une démonstration de sa validité à travers une comparaison entre les valeurs mesurées sur le terrain et les valeurs simulées par le modèle. C'est dans cette optique de démonstration de la validité du modèle de simulation que s'inscrit la présente étude dans la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso.

L'objectif global de cette étude est d'évaluer la possibilité de simuler avec une marge d'erreur limitée le fonctionnement d'exploitations coton-céréales-élevage de l'Ouest du Burkina Faso

à travers l'analyse du bilan alimentaire, du bilan minéral du sol et du solde économique de l'exploitation. Il consiste donc en d'autres termes à valider un modèle agronomique à l'échelle de l'exploitation.

Il s'agira d'une manière spécifique :

- d'évaluer la sensibilité du modèle à certaines valeurs des données d'entrées ;
- de comparer à l'échelle de l'exploitation, la production agricole (cultures de rente et céréalière) réelle à celle obtenue par simulation ;
- d'évaluer les écarts entre les bilans minéraux obtenus expérimentalement et ceux fournis par l'outil de simulation grâce à des analyses chimiques de sol et de fumure organique ;
- de comparer les charges économiques réelles liées aux cultures aux charges économiques calculées par le modèle.

1. Synthèse bibliographique

1.1. Approches conceptuelles de la modélisation

Dans la plupart des domaines de recherche, la modélisation est devenue une approche privilégiée pour décrire des systèmes complexes, pour prédire, pour évaluer des risques ou aider à la décision. La modélisation est l'activité qui consiste à convertir un système réel en un modèle représentant ce système réel (Dzotsi, 2002). Le modèle est défini aussi comme une représentation simplifiée de la réalité (Coquillard et Hill, 1997 ; van Ittersum et Donatelli, 2003 cité par Andrieu, 2004). Bonhomme (1997) dans le cas de modèle mathématique, le définit comme un ensemble de relations mathématiques qui se composent de variables d'entrée, de paramètres relatifs aux différents processus modélisés et de variables de sortie. Prost (2008), dans un cadre plus général décrit le modèle comme un raisonnement cognitif qui permet de décrire une partie de la réalité.

Pour Prost (2008), deux objectifs sous tendent la conception des modèles : (i) les modèles sont conçus pour l'exploration, la compréhension de mécanismes ; (ii) ils sont conçus pour être utilisés par d'autres personnes que leurs auteurs. Pour ce faire, plusieurs étapes sont nécessaires afin d'aboutir à une utilisation effective du modèle par d'autres utilisateurs. Il s'agit entre autres des étapes de la conception, de l'analyse de la sensibilité et de la validation (Savary, 1994) qui constituent les différentes étapes du développement d'un modèle de simulation (figure 1). La conception d'un modèle simplifié passe nécessairement par l'utilisation des données empiriques existantes ou fournies par la littérature. L'étape suivante de l'analyse de sensibilité qui consiste essentiellement à faire varier successivement les entrées ou paramètres du modèle est nécessaire afin d'apprécier l'impact de chacun d'entre eux sur le comportement du modèle. Cette étape est souvent couplée à une autre étape de validation, afin de vérifier si les sorties du modèle sont en accord avec les données de terrain.

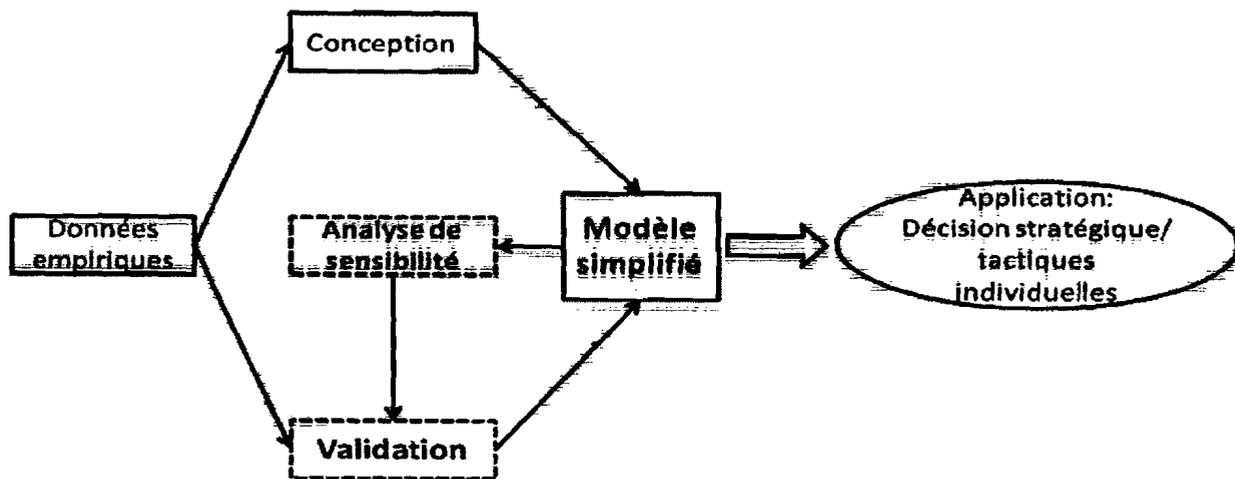


Figure 1 : Canevas général d'évolution d'un modèle de simulation et son domaine d'application (Savary, 1994)

1.2. Analyse de la sensibilité

Cette phase détermine combien les variations des paramètres et/ou des entrées du modèle influencent les résultats du modèle (Jones et Luyten, 1998). L'analyse de la sensibilité du modèle permet de jauger son comportement suite aux variations causées par l'évolution des conditions réelles (Adden, 2005). En faisant varier par simulation les entrées et les paramètres dans des gammes choisies de variabilité ou d'incertitude, les méthodes d'analyse de sensibilité globale permettent de comparer quantitativement les effets et interactions de ces facteurs sur les sorties du modèle.

Ainsi, selon Saltelli *et al.* (1999), il est impératif pour l'utilisateur d'un modèle de chercher à savoir comment réagit son modèle aux données d'entrée afin de comprendre le comportement du modèle vis-à-vis de ces données et d'évaluer la cohérence entre le modèle et le système qu'il représente. Cette recherche ne peut se faire que par le biais d'une analyse de sensibilité (AS) du modèle, qu'il soit numérique ou autre (Saltelli *et al.*, 1999).

Selon Kleijnen (1995), l'AS peut être considérée comme une investigation systématique de la réaction d'un modèle vis-à-vis des valeurs extrêmes de ses paramètres et de ses données d'entrées ou des changements drastiques dans sa structure. Selon Jolicoeur (2002), les paramètres dans un modèle mathématique complexe sont parfois très nombreux, et tous n'ont pas le même degré d'influence sur les sorties du modèle. Il y en a qui sont beaucoup plus importants que d'autres. Ainsi, une analyse de sensibilité peut aider à prédire l'effet de chaque paramètre sur les résultats du modèle et à les classer suivant leur degré de sensibilité (Saltelli *et al.*, 2000a). La connaissance de cette information est très importante pour l'utilisateur d'un modèle, elle renseigne ce dernier sur le niveau de précision que doit avoir chaque paramètre et l'attention qu'on doit lui accorder lors de sa détermination sur le terrain ou au laboratoire (Jolicoeur, 2002).

1.3. Concepts de la validation des modèles

La validation du modèle consiste à juger la qualité de prédiction fournie par le modèle (Chevalier-Gérard et *al.*, 1994). Elle doit donc déterminer si le modèle est, dans son cadre expérimental, une représentation acceptable du système réel cohérente avec l'utilisation souhaitée (Kleijnen et Sargent, 2000). Elle consiste généralement à comparer les sorties du modèle à partir de données indépendantes (Rykiel, 1996). Pour certains auteurs (Sinclair et Scigman, 1996), la validation des modèles est impossible compte tenu du fait qu'ils sont une collection d'hypothèses alors que pour d'autres (Monteith, 1996; Cournut, 2001 ; Woodward et Rollo, 2002; Cros *et al.*, 2003), ils ne peuvent être que partiellement validés.

Avant toute validation, il est nécessaire de spécifier l'objectif de la modélisation, les critères de validation c'est à dire les critères à atteindre pour admettre son acceptabilité et le contexte, défini par les simplifications et les hypothèses qui ont contribué à sa réalisation (Rykiel, 1996). Trois volets de la validation ont été identifiés par ce dernier auteur :

- la validation opérationnelle qui est pragmatique et consiste à déterminer si les sorties du modèle reproduisent correctement le système sans évaluer si la base scientifique est correcte ou que la structure interne est identique à celle du système ;
- la validation conceptuelle indique que les théories et simplifications sont correctes ou justifiables et que la structure et les relations entre les composantes du système sont raisonnables compte tenu de l'objectif du modèle ;
- la validation des données certifie de leur qualité et de leur bonne interprétation.

Parmi ces trois volets, les validations opérationnelle et conceptuelle ont retenu notre attention. Coquillard et Hill (1997), ont défini une modalité d'évaluation pour ces deux volets. Il s'agit de la validation fonctionnelle qui vise à exploiter le modèle comme instrument de mesure et d'expérimentation afin de s'assurer de son bon fonctionnement. Elle comprend l'analyse de sensibilité consistant à faire varier certains paramètres d'entrée et à vérifier que le comportement du modèle reste toujours cohérent. Elle englobe aussi l'utilisation de tests de conditions extrêmes dans lesquels on s'assure que le comportement du système reste plausible pour des valeurs extrêmes souhaitables ou non des paramètres d'entrée. Elle traite enfin de la validité structurelle qui permet non seulement de vérifier que les résultats fournis sont satisfaisants, mais aussi que la structure interne de ce modèle correspond à la structure de fonctionnement de la réalité. A la lumière de cette revue se dessine la démarche méthodologique à adopter afin d'atteindre les objectifs fixés.

2. Matériel et méthodes

2.1. Zone d'étude

Cette étude a été menée dans deux villages, Koumbia et Kourouma situés dans la zone soudanienne à l'Ouest du Burkina (figure 2).

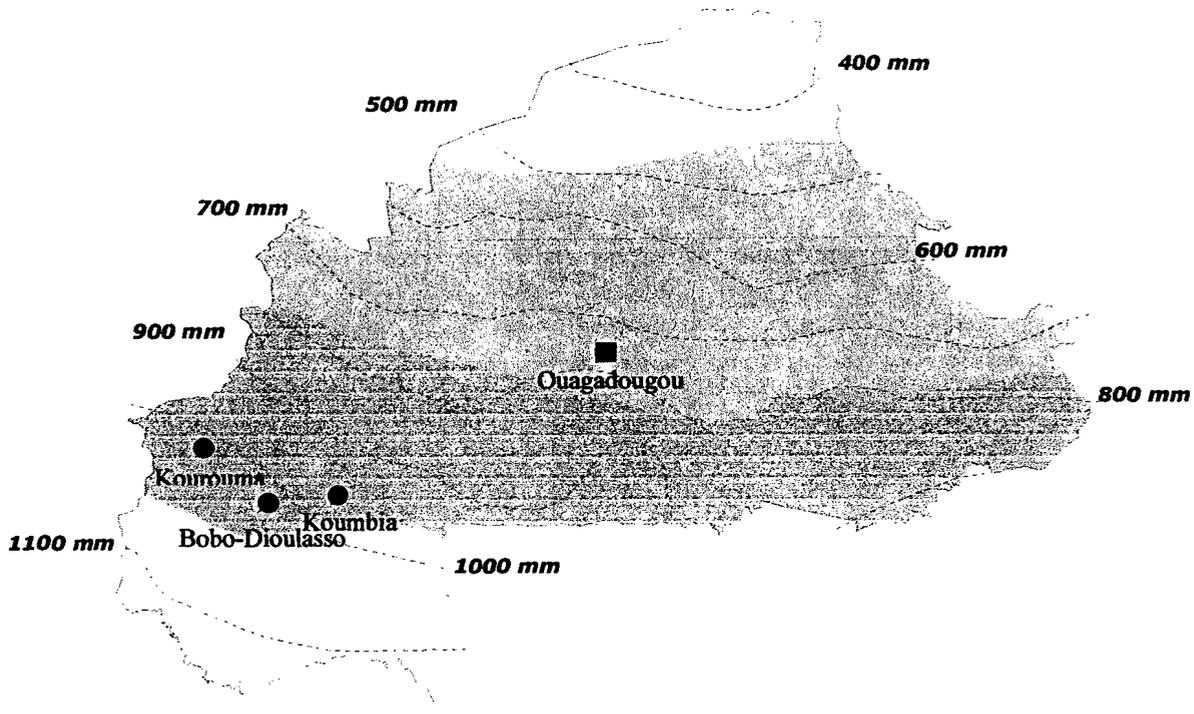


Figure 2 : localisation des deux villages (adaptée par Andrieu et al., 2009)

Koumbia (Latitude 12°42'20''Nord; longitude 4°24'01''Est ; altitude 290 m) est une commune rurale de la province de Tuy située à 67 km à l'Est de Bobo-Dioulasso. L'emprise agricole est estimée à 35% de la surface du territoire villageois et la densité du bétail est de 45 UBT/km² (Corus, 2007). Les systèmes de production sont principalement composés de céréaliculture, de cotonculture et d'élevage bovin (Diallo, 2006). La typologie des unités de production de Koumbia et Waly réalisée par Blanchard (2005), a mis en évidence trois principaux types de systèmes de production : les éleveurs (9%), les agriculteurs (84%) et les agro-éleveurs (7%).

Le village de Kourouma (Longitude 30°45'59'' Ouest ; latitude 12°87'29'' Nord et 337 m d'altitude) se situe dans la province du Kéné Dougou, à 83 km au Nord-Ouest de Bobo-Dioulasso. L'emprise agricole est estimée à 45% de la surface du territoire villageois et la densité du bétail est de 50 UBT/ km² (Corus, 2007). Dans ce village, Daho (2006), a identifié trois grands groupes d'unités de production à l'image de ceux identifiés à Koumbia à savoir les agriculteurs (73%), les agro-éleveurs (17%) et les éleveurs (10%).

La figure 3 présente les relevés pluviométriques de l'année 2009 enregistrés dans les deux villages.

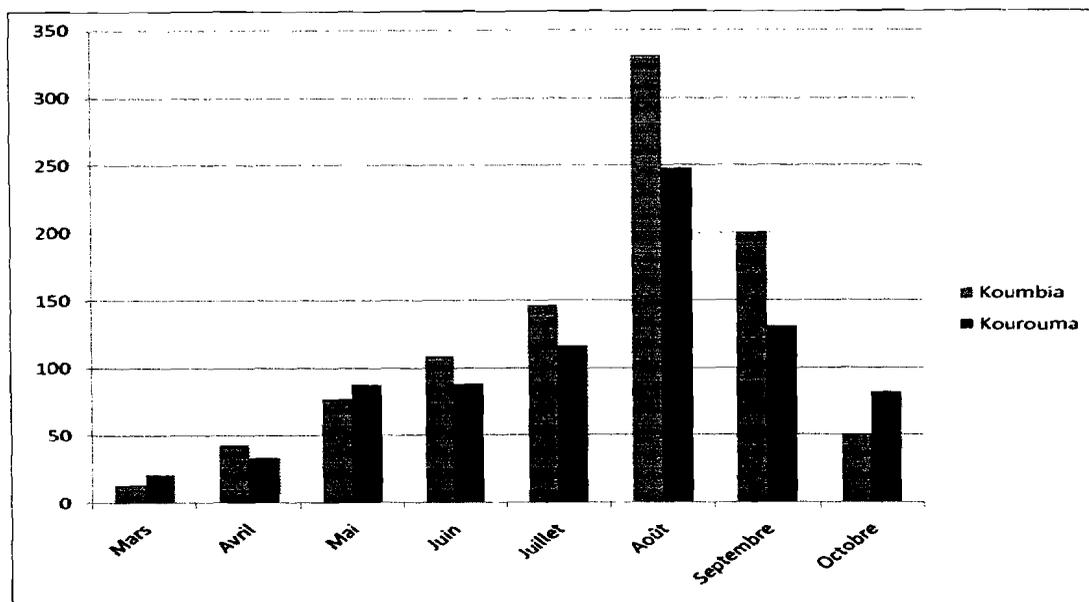


Figure 3 : Pluviométrie mensuelle (mm) de 2009 enregistrée à Koumbia et à Kourouma

2.2. Le modèle

2.2.1. Présentation du modèle

Le modèle utilisé dans cette étude simule le fonctionnement technico-économique d'une exploitation à l'échelle d'une année et permet d'analyser l'impact d'une transformation de l'exploitation liée par exemple à la modification de l'assolement, l'amélioration de la production de fumure organique, l'introduction d'un atelier d'embouche (Andricu *et al.*, 2009).

La construction du modèle a suivi une démarche en trois étapes :

- la construction du modèle conceptuel à partir de l'analyse du fonctionnement technico-économique d'un échantillon d'exploitations de Koumbia représentatives de la diversité des systèmes (2 éleveurs, 2 agriculteurs, 2 agro-éleveurs) ;
- le développement du modèle ;
- la validation du modèle à dire d'experts. Elle est basée sur l'expérience des experts du système et consiste généralement à leur demander si le comportement du modèle est cohérent avec leur connaissance de la réalité. Cette validation est fondée essentiellement sur des enquêtes et n'intègre pas des mesures de terrain.

Le choix du pas de temps du modèle, de son niveau de simplification et de détail a été possible grâce à une analyse du fonctionnement des systèmes de production enquêtés.

L'année simulée est divisée en trois saisons : la saison pluvieuse, la saison sèche chaude, la saison sèche froide. Pour chaque saison, le modèle calcule en fonction des données entrées

par l'utilisateur - caractéristiques structurelles de l'exploitation, décisions stratégiques et tactiques, type d'année - trois principaux bilans : le bilan alimentaire, le bilan minéral, le bilan fourrager ainsi que le solde économique des activités agro-pastorales. Les caractéristiques structurelles renseignées par l'utilisateur concernent le 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 décisions renseignées par l'utilisateur concernent le choix d'assolement, les achats et ventes d'animaux, la part des résidus de culture disponibles récoltés, la complémentarité 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.

Le modèle ou « calculatrice » (appellation utilisée par les producteurs des deux villages pour faciliter la compréhension) a été développé sous Excel. Ce langage est plus facile à maîtriser que d'autres langages nécessitant des compétences en programmation et permet par conséquent d'aboutir à un prototype fonctionnel en très peu de temps. Cette calculatrice comporte sept modules (figure 4) reflétant les interactions entre systèmes de culture et d'élevage au sein des exploitations.

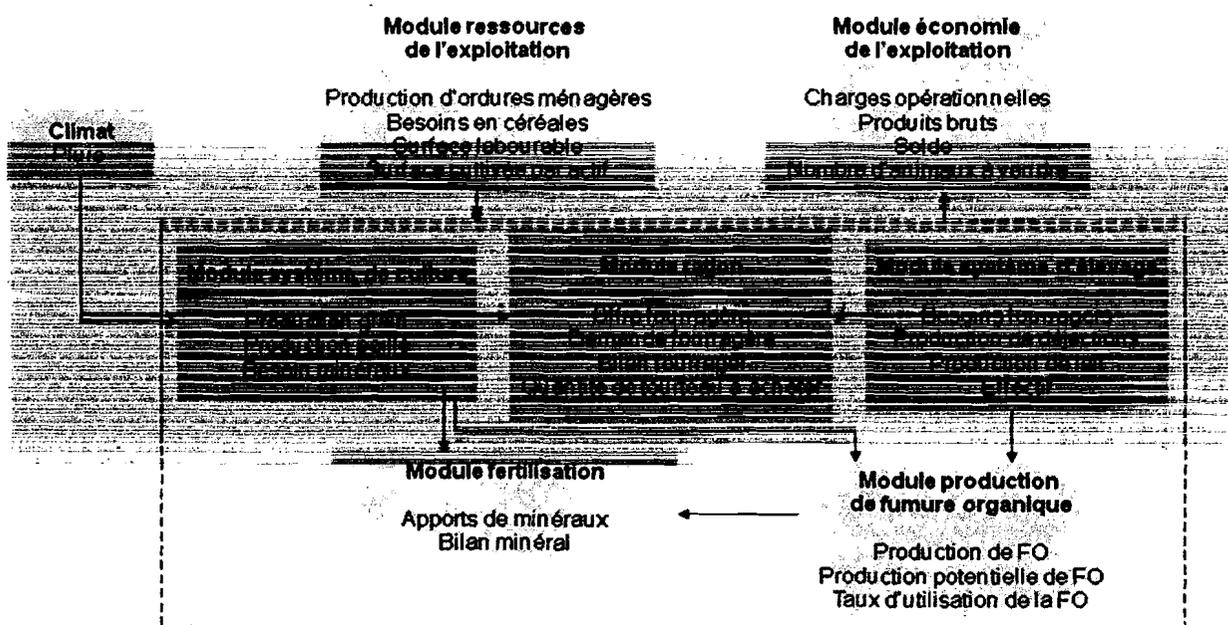


Figure 4 : Modèle conceptuel utilisé pour implémenter le simulateur Excel (Andrieu et al., 2009)

Le module système d'élevage prend en compte 5 lots d'animaux rencontrés généralement dans les exploitations. Il s'agit des bovins de trait (BT), des bovins d'élevage (BE), des vaches laitières (VL), des petits ruminants (PR) et des bovins d'embouche (Emb). Pour ce qui

est du module système de culture, les principales cultures pratiquées dans les deux zones ont été retenues : le coton, le maïs, le sorgho, les cultures secondaires (représentées ici par le niébé), les cultures fourragères (représentées ici par le niébé fourragé).

La figure 5 présente l'interface des entrées (à gauche de la figure) et des sorties (à droite de la figure) du modèle de simulation mis en place.

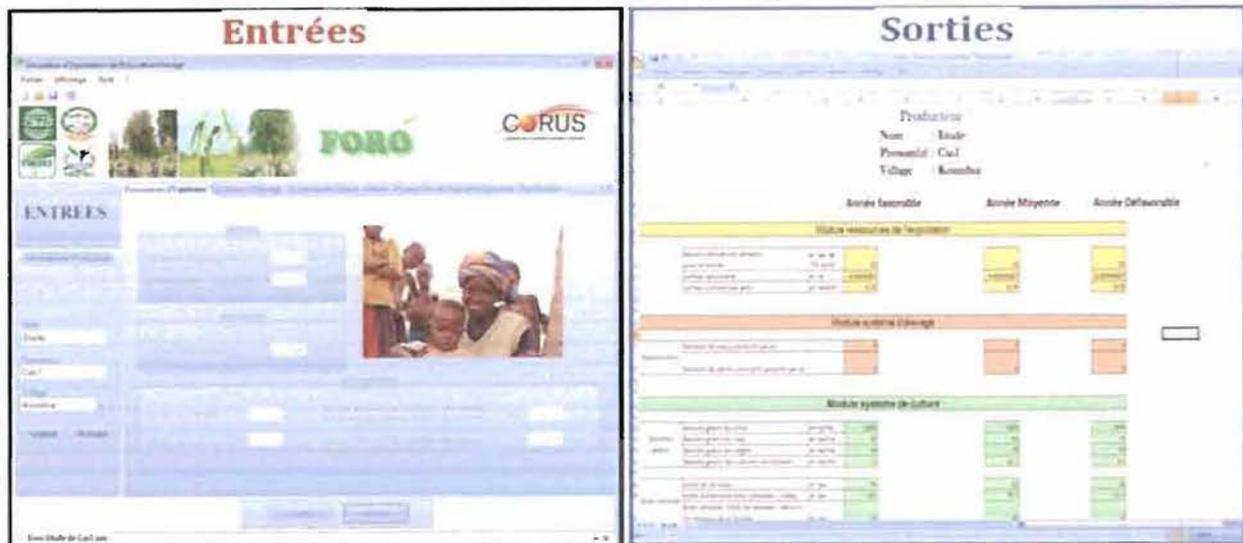
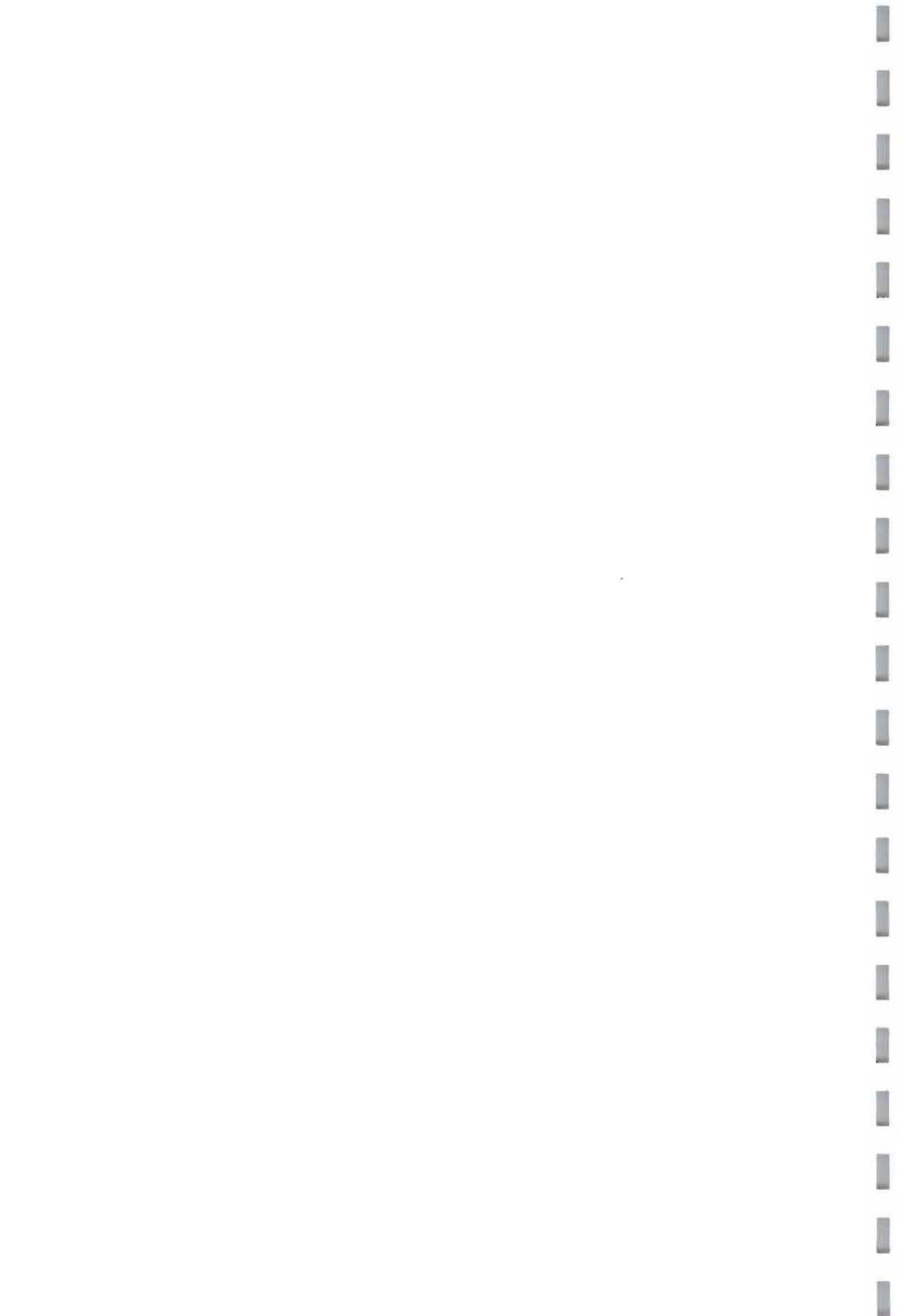


Figure 5 : Interfaces du simulateur

2.2.2. Les différentes simplifications

L'objectif majeur qui a sous tendu la construction du modèle est de pouvoir rapidement présenter aux agriculteurs l'impact de leur mode de gestion actuel ou de scénarios innovants afin de lancer des réflexions favorisant la co-construction de systèmes innovants. Pour ce faire, le modèle se devait d'être simple à utiliser et comprendre (compréhension des calculs réalisés) par les conseillers techniques jouant le rôle de médiateurs entre les chercheurs et les producteurs. Ce choix a influé sur la structure du modèle et entraîné des restrictions et des hypothèses simplificatrices.

En effet, pour la structure du modèle, le choix a été fait de ne pas modéliser les décisions du producteur. Elles constituent néanmoins des entrées du modèle (choix d'assolement, nombre d'animaux vendus...) qui vont influencer sur les différents bilans calculés. Les processus biophysiques modélisés sont représentés par des données moyennes (par exemple la production de biomasse est représentée par un rendement moyen variant en fonction du type d'année) ou des calculs simplifiés (par exemple les exportations d'éléments minéraux sont fonction de la biomasse produite et de la quantité moyenne d'éléments minéraux dans 1 kg de biomasse).



En ce qui concerne les hypothèses simplificatrices, au niveau du module ration, l'alimentation des animaux complémentés durant la saison sèche chaude se fait uniquement à base de stocks de résidus réalisés durant la saison sèche froide et tout déficit fourrager se traduit par des achats de tourteaux. Seuls les tourteaux de coton sont pris en compte comme aliment bétail acheté pour la complémentation des animaux choisis. De plus la complémentation concerne l'ensemble des animaux du ou des lots choisis (et non les quelques animaux affaiblis du lot comme cela peut parfois être observé). Au niveau du module fertilisation, les doses de fumure organiques et minérales des cultures ne sont pas prises en compte dans le calcul des rendements mais uniquement pour le calcul du bilan minéral.

2.3. Collecte et analyse des données

L'étude a été conduite simultanément en deux étapes. La première étape a consisté à analyser la sensibilité du modèle par rapport aux données d'entrées. Et la deuxième étape a été de voir le réalisme des sorties du modèle par rapport aux données mesurées sur le terrain. Pour ce faire, 26 exploitations (12 à Kourouma et 14 à Koumbia) ont été choisies et retenues sur la base du volontariat et de la disponibilité du chef de l'exploitation. En plus de ces deux critères, chaque exploitation répondait à l'un des trois grands types d'unités de production à savoir les agriculteurs, les agro-éleveurs et les éleveurs.

2.3.1. Analyse de la sensibilité

L'analyse de sensibilité a porté sur les données d'entrées du modèle. Les données utilisées pour cette analyse de sensibilité proviennent d'une exploitation de Kourouma (tableau I). Ces données ont également été utilisées pour une seconde analyse de sensibilité qui a porté sur les paramètres du modèle (Chaibou Dan Inna *et al.*, 2009).

Pour l'analyse de sensibilité du modèle aux données d'entrées, la méthode « Screening Designs » (SD) de l'approche One-Factor-At-A-Time (OAT) a été utilisée. Le but de cette méthode est d'isoler les facteurs les plus importants parmi de nombreux autres pouvant affecter une sortie particulière d'un modèle donnée (Nearing *et al.*, 1990).

Son choix est basé sur le fait que son utilisation est assez aisée dans les modèles possédant de nombreux paramètres d'entrée (Jolicoeur, 2002), comme c'est le cas du modèle sur lequel porte notre travail.

L'application de la méthode "screening designs" (OAT), consiste pour nous à modifier alternativement chaque entrée du modèle de -10 % et +10 % autour de sa valeur initiale tout en gardant fixes les autres paramètres au cours de la simulation. Dans le modèle, certains paramètres d'entrée ne peuvent pas être modifiés par +10 % et -10 % par rapport à la valeur

initiale (données qualitatives) et donc ne sont pas pris en compte. Par exemple, les variables du module rations et du module production de fumure organique. Concernant le module ration, seuls les bovins de trait et les bovins d'embouche ont été retenus pour une complémentation de leur ration en saison sèche chaude. Au niveau du module production de fumure organique on a trois modalités d'entrées qui sont : fosse, parc, néant. Au niveau du module système d'élevage, les valeurs des données d'entrées ont été arrondies à l'unité supérieure car le nombre des animaux est toujours un entier. Aussi, les entrées qui ont des valeurs nulles (0 ha de sorgho, 0 Bovin de trait acheté durant la saison sèche froide, ...) ne sont pas testées dans cette étude.

Les modules qui feront l'objet de cette analyse sont : le module ressources de l'exploitation, les modules système d'élevage / système de culture, le module fertilisation et le module économique (tableau I).

Tableau I : Variables d'entrées et valeurs considérées lors de l'AS

variables d'entrées		valeurs de base	valeurs max	valeurs min
Module ressources de l'exploitation	Nombre de bouches à nourrir	20	22	18
	Nb max charrettes (petit plateau) de FO que la fosse peut contenir	40	44	36
	Nb max de charrettes de pailles que l'exploitant peut stocker	40	44	36
	Surface totale cultivée (ha)	20	22	18
Module Système d'élevage	Nombre de bœufs de trait au début de l'hivernage	8	9	7
	Nb global de bovins d'élevage au début de l'H (sauf BT et B emb)	7	8	6
	Nb de vaches laitières mises à la reproduction au début de l'H	3	3	3
	Nombre de petits ruminants au début de l'hivernage	10	11	9
Module système de culture	Nombre d'hectares de coton	8	8,8	7,2
	Nombre d'hectares de maïs	6	6,6	5,4
	Nombre d'hectares de sorgho	3,5	3,85	3,15
	Nombre d'hectares de cultures secondaires	2	2,2	1,8
	Nombre d'hectares de cultures fourragères	0,5	0,55	0,45
Module fertilisation	Quantité de NPK épanchée /ha de coton (kg)	150	165	135
	Quantité de NPK épanchée /ha de maïs (kg)	100	110	90
	Quantité d'urée épanchée /ha de coton (kg)	50	55	45
	Quantité d'urée épanchée /ha de maïs (kg)	50	55	45
	Quantité d'urée épanchée /ha de sorgho (kg)	50	55	45
Module Economique	Qté de maïs (en sacs) à mettre en réserves	20	22	18
	Nombre de litres d'herbicide total Touchdown achetés	20	22	18
	Nombre de litres d'herbicide coton CotonDom achetés	8	9	7
	Nombre de litres d'herbicide maïs Altram achetés	18	20	16
	Nombre de litres d'insecticides 1er type achetés	16	18	14
	Nombre de litres d'insecticides 2ème type achetés	8	9	7
	Nb de journées payées à une main d'œuvre extérieure journalière	10	11	9
	Montant annuel des frais vétérinaires (F CFA)	50000	55000	45000
	Montant annuel des frais de sel pour les animaux (F CFA)	20000	22000	20000

Nb : nombre ; B emb : Bovin d'embouche ; BT : Bovin de trait ; H : hivernage ; SSF : saison sèche froide ; SSC : saison sèche chaude ; FO : fumure organique, N : azote ; P : phosphore ; K : potassium ; AS : analyse de sensibilité.

La modification de chaque variable d'entrée par +10 % et -10 % produit deux valeurs pour chacune des sorties. De ces deux valeurs d'entrée, celle produisant la plus grande variation au

niveau d'une sortie donnée est retenue pour l'évaluation et par conséquent pour le calcul de son indice de sensibilité (IS). Un pourcentage de variation (Favis-Mortlock et Smith, 1990) et un indice de sensibilité (Jolicoeur, 2002) sont calculés pour chacune de ces sorties. Ils sont obtenus par les formules suivantes :

$$\% \text{ de variation} = \left| \frac{S_2 - S_1}{S_1} \right| \times 100$$

$$IS = \frac{\frac{S_2 - S_1}{S_{\text{moy}}}}{\frac{E_2 - E_1}{E_{\text{moy}}}}$$

Avec :

IS : indice de sensibilité de la sortie du modèle ; E_1 : la valeur d'entrée de base ;

E_2 : la valeur testée (+10 % ou - 10 %) ; E_{moy} : la moyenne entre E_1 et E_2 ;

S_1 et S_2 : sorties correspondant respectivement aux entrées E_1 et E_2 ;

S_{moy} : la moyenne entre S_1 et S_2 .

Cet indice permet d'avoir une base quantitative pour exprimer la sensibilité des sorties du modèle vis-à-vis des variables d'entrée. Un indice de sensibilité égal à 1 indique que le taux de variation d'une entrée donnée entraîne le même taux au niveau des sorties ; une valeur négative indique que les entrées et les sorties varient en sens inverse et plus grand est l'indice en valeur absolue plus grand est l'impact qu'une entrée donnée pourra avoir sur une sortie spécifique. Les sorties concernées ont été consignées dans le tableau II.

Tableau II : Sorties concernées par l'AS

Modules	Sous modules
Système de culture	Bilan céréalier, Récoltes potentielles de pailles
Ration	Bilan en UF et MAD pour le nombre d'animaux choisi et pour la saison sèche chaude, Nombre de sacs de tourteaux de coton à acheter pour compléter le nombre d'animaux choisis pendant la saison sèche chaude, Dose de tourteau de coton à distribuer par jour et par animal pendant la saison sèche chaude
Fertilisation	Fertilisation totale sur coton, maïs et sorgho, Bilans minéraux (N, P, K)
Economique lié à l'agriculture	Charges opérationnelles, Produits brut, Bilan

2.3.2. Validation du modèle

Pour cette étape, il s'agissait de comparer certaines sorties du modèle aux résultats d'observation de terrain (tableau III). Ces sorties ont concerné 3 modules (le module système de culture, le module fertilisation des cultures et le module économique lié à l'agriculture) du modèle. Une validation exploratoire a également été faite sur quelques producteurs (7) qui dans le cadre du projet Corus se sont portés volontaires pour mener une activité d'embouche bovine. Cette validation a concerné les modules système d'élevage et économique lié à l'élevage (annexe 1).

2.3.2.1. Collecte de données pour la validation

Le tableau III présente la façon dont on a procédé pour collecter les données de terrain ainsi que celles qui ont servi pour la simulation.

Tableau III : Protocole de collecte des données

Modules	Sorties	Recueil des données mesurées	Recueil des données pour les simulations
Système de culture	rdt coton		
	rdt maïs	Pose de 3 carrés de rendement (9m ²) suivant la diagonale dans chaque parcelle de culture et par exploitation ;	Suivis périodiques (chaque 15 jours) de toutes les activités agricoles auprès des 26 chefs d'exploitations durant la campagne hivernale 2009-2010 ; Activités agricoles concernées : superficie et itinéraire technique de chaque culture (fiche de suivi en annexe 2)
	rdt sorgho		
	rdt CS	Mesures de poids (poids humide au champ et poids sec après séchage) à la récolte et évaluation des rendements.	
	rdt maïs paille		
	rdt sorgho paille		
rdt fanes CS			
Fertilisation	Bilans en N sur le coton, maïs, sorgho et CS	<u>2 séries de prélèvements de sol</u> 1 ^{ère} série : juste avant le début de la campagne hivernale (mai) sur les parcelles destinées aux différentes cultures concernées ;	Suivis périodiques (chaque 15 jours) de toutes les activités agricoles auprès des 26 chefs d'exploitations durant la campagne hivernale 2009-2010 ; Activités agricoles concernées : quantités de FO, NPK et Urée épandues sur les différentes cultures
	Bilans en P sur le coton, maïs, sorgho et CS	2 ^e série : après la campagne hivernale (décembre) sur les mêmes parcelles concernées par la 1 ^{ère} série.	
	Bilans en K sur le coton, maïs, sorgho et CS	<u>1 série de prélèvements de fumure organique</u> avant la campagne hivernale ; Echantillons de sols et FO analysés au laboratoire Sol-Eau-Plante du programme GRN-SP/Ouest (INERA/Farako-Ba)	
Economique	Charges liées à l'agriculture	Suivis périodiques (chaque 15 jours) de toutes les activités agricoles auprès des 26 chefs d'exploitations durant la campagne hivernale ; Activités agricoles concernées : achats des intrants agricoles, rémunération de la main d'œuvre (MO) et autres.	Suivis périodiques (chaque 15 jours) de toutes les activités agricoles auprès des 26 chefs d'exploitations durant la campagne hivernale 2009-2010 ; Activités agricoles concernées : quantités d'herbicide et d'insecticide utilisés sur les cultures, nombre de jours payés à une MO extérieure, dépenses liées à l'achat d'équipement.

Rdt : rendement, CS : culture secondaire, MO : main d'œuvre, FO : fumure organique ; N : azote ; P : phosphore ; K : potassium

Le nombre de parcelles par village et par culture utilisé pour la validation des sorties du module système de culture est consigné dans le tableau IV.

Tableau IV : Nombre de parcelles par culture pour chaque village

Cultures	Maïs	Sorgho	coton	niébé	Total
Koumbia	17	9	9	7	42
Kourouma	15	6	9	8	38
Total	32	15	18	15	80

2.3.2.2. Analyses statistiques des données

La validation du modèle consiste à comparer les variables de sortie du modèle et les résultats d'observation de terrain (Bouazzama et al., 2007 ; Bamba, 2008). Parmi les critères statistiques généralement utilisés pour la validation on a la Root Mean Square Error (RMSE), l'efficacité (EF), le coefficient de masse résiduel (CRM) et le coefficient de corrélation (r).

La **RMSE (ROOT MEAN SQUARE ERROR)** est la racine carré de la moyenne des écarts quadratiques entre les valeurs observées et les valeurs calculées par le modèle. Une valeur proche de zéro indiquerait que les valeurs calculées par le modèle sont proches des valeurs observées (Fox, 1981).

$$la\ MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)^2$$

$$la\ RMSE = \sqrt{MSE}$$

Avec Y_i la valeur observée et Y'_i la valeur calculée par le modèle et N le nombre d'observations

Pour faciliter les comparaisons, il est bon de la relativiser en l'exprimant en pourcentage des moyennes mesurées des variables (**NRMSE**). Ce pourcentage représente l'erreur de prédiction (Kobayashi et Us Salam, 2000).

$$NRMSE = (RMSE \times 100) / Moyenne\ des\ valeurs\ mesurées.$$

L'**efficacité (EF)** permet de mesurer la qualité de prédiction du modèle par rapport à la moyenne des observations (Greenwood et al., 1985).

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}$$

\bar{Y} Représente la moyenne des observations

Si le modèle est parfait alors, pour tout i on aura $Y_i = Y'_i$ et $EF=1$. Si le modèle utilise la moyenne des observations on aura $Y_i = \bar{Y}$ pour tout i et $EF=0$. Un modèle avec une efficacité

proche de zéro ne sera pas considéré comme un bon modèle car il ne fait pas mieux que la moyenne. L'efficacité est toujours inférieure à 1 mais ne possède pas de borne inférieure car un modèle peut être encore plus mauvais en terme de qualité de prédiction que la moyenne.

Le coefficient de masse résiduel (CRM) (Loague et Green, 1991).

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n Y'_i}{\sum_{i=1}^n Y_i}$$

Si $CRM < 0$, cela implique que le modèle surestime les prédictions, en revanche si $CRM > 0$, il les sous-estime ; le mieux est d'avoir un CRM le plus proche possible de 0.

Le coefficient de corrélation « r ». Il indique l'existence ou la non existence d'une relation linéaire entre les valeurs observées et les valeurs calculées (Addiscott et Whitmore, 1987).

$$r = \frac{\hat{\sigma}_{yy'}}{\hat{\sigma}_y^2 \hat{\sigma}_{y'}}^2$$

Où $\hat{\sigma}_y^2$, $\hat{\sigma}_{y'}^2$ et $\hat{\sigma}_{yy'}$, sont respectivement les variances estimées de Y, Y', et la covariance estimée de Y et Y'.

Pour r allant de :

0,0 à 0,3 : très faible corrélation (TfC) ;

0,3 à 0,5 : faible corrélation (fC);

0,5 à 0,7 : moyenne corrélation (MC);

0,7 à 0,9 : forte corrélation (FC);

0,9 à 1,0 : très forte corrélation (TFC).

Si $r = 1$, cela signifie qu'il existe une relation linéaire entre les valeurs observées Y et celles calculées Y', mais cela ne signifie pas que les valeurs observées sont égales aux valeurs calculées car par exemple la relation peut être du type $Y = 0,1 \times Y'$ pour tout i. Dans cet exemple la valeur du r sera 1 mais les valeurs calculées sont dix fois plus petites que les valeurs observées. Il est donc intéressant d'utiliser ce critère avec la valeur de la NRMSE : un bon modèle aura alors une faible valeur de NRMSE et un r proche de 1.

Pour la réalisation de ces différentes analyses statistiques, nous avons utilisé le programme IRENE (Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates) qui est un outil d'analyse de données conçu pour fournir un accès facile aux techniques statistiques d'évaluation des modèles.

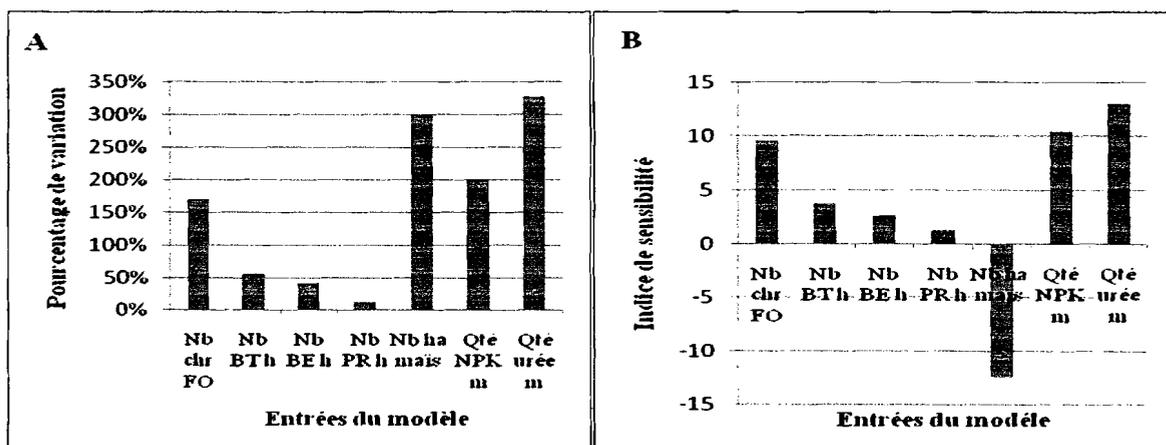
3. Résultats et discussion

3.1. Analyse de la sensibilité du modèle

La variation de + ou - 10% des entrées du modèle considérées dans cette analyse de sensibilité a produit souvent des variations non négligeables des sorties du modèle. L'analyse de la sensibilité de ce modèle de simulation s'est appuyée sur le pourcentage de variation et sur l'indice de sensibilité. Les figures suivantes présentent les différentes sorties dont les variations à + ou - 10% des entrées ont donné des pourcentages de variation supérieurs à 10% et des IS supérieurs à 1.

3.1.1. Sensibilité de la sortie « bilan en N sur le maïs »

Les modifications de certaines données d'entrées de + ou - 10% donnent des changements allant de 14,28% à 328,5% au niveau de la sortie « bilan en N (azote) sur le maïs ». Ainsi, la quantité d'urée/ha sur le maïs (Qté urée m), le nombre d'ha de maïs (Nb ha maïs), la quantité d'NPK/ha sur le maïs (Qté NPK m) et le nombre maximum de charrettes (petit plateau) de fumure organique que la fosse peut contenir (Nb chr FO) sont celles qui influent le plus sur cette sortie (figure 1A et 1B). Elles donnent des variations respectives de 328,5, de 300, de 200 et de 171%. Pour ces entrées, les IS de la sortie « bilan en N (azote) sur le maïs » ont varié de -12,4 à 13,05. Cette sortie est beaucoup plus sensible à l'entrée « Qté urée m » avec un IS= 13,05 suivie de l'entrée « Nb ha maïs » avec IS égal à -12,4, l'entrée « Qté NPK m » avec un IS de 10,5 et enfin « Nb chr FO » avec un IS de 9,69. L'entrée « Nb ha maïs » varie en sens inverse que la sortie « bilan N sur le maïs » car son IS est négatif. C'est-à-dire que lorsque l'on augmente la superficie du maïs de plus 10% on note obtient un bilan en azote inférieur de plus de 10% à la valeur de base.



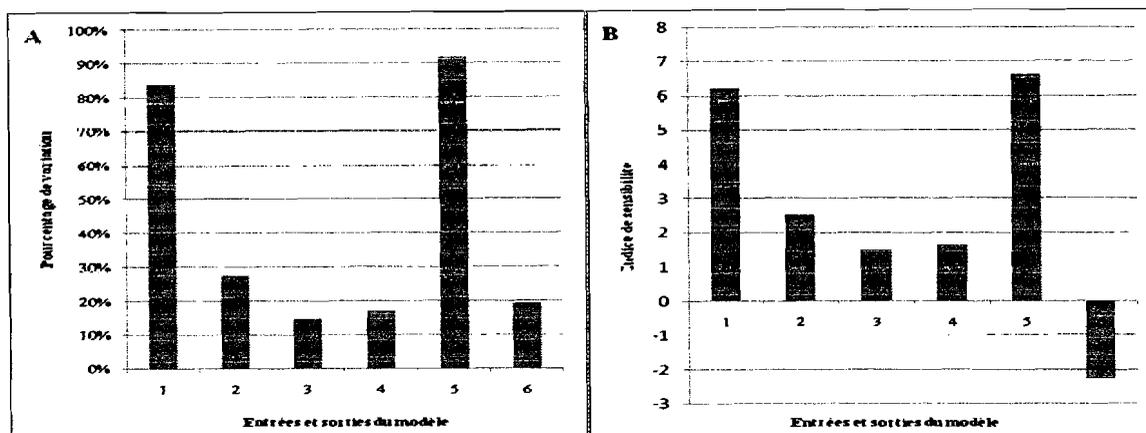
Nb chr FO : nombre maximum de charrettes (petit plateau) de fumure organique que la fosse peut contenir ; Nb BT h : nombre de bovin de trait au début de l'hivernage ; Nb BE h : nombre global de BE au début de l'hivernage ; Nb PR h : nombre de petits ruminants au début de l'hivernage ; Nb ha m : nombre d'ha de maïs ; Qté NPK m : quantité de NPK/ha sur le maïs ; Qté urée m : quantité de Urée/ha sur le maïs

Figure 6. Pourcentage de variation de la sortie bilan en N sur maïs par rapport aux entrées (A). IS de la sortie bilan en N sur maïs par rapport aux entrées (B).

Cette analyse montre que des imprécisions assez importantes sur ces entrées peuvent fausser énormément les résultats obtenus pour la sortie « bilan en N sur le maïs ». En effet, le « nb ha maïs », la « Qté NPK m », la « Qté urée m » ainsi que « le Nb chr FO » influent sur le calcul du bilan minéral et en particulier celui du bilan azoté. Selon ce calcul, il existe une quantité de FO, de NPK et d'urée à appliquer pour une superficie donnée de culture de maïs afin de permettre un équilibre entre les importations et exportations d'éléments minéraux. En faisant varier par exemple la superficie de la culture du maïs de -10% on observe une augmentation de la disponibilité de l'azote et par conséquent un bilan en azote sur le maïs amélioré (IS inférieur à 0). Les sources d'apports en azote au niveau du maïs sont plus importantes que celles des autres éléments minéraux (P et K) ce qui explique donc cette forte sensibilité de la sortie bilan en N sur maïs par rapport à l'entrée « nb ha maïs ». Le même phénomène s'observe lorsque l'on fait varier la quantité de fumure organique, de NPK ou d'urée. Une attention particulière doit donc être prise lorsque l'on enregistre ces entrées afin de minimiser les variations anormales.

3.1.2. Sensibilité des sorties « bilan en N, P, K sur coton, en P sur maïs et en N sur sorgho » par rapport aux entrées quantités de N, P, K apportées

La sortie bilan en N sur le coton (5 et 1) subit essentiellement l'influence respective des entrées quantité d'urée/ha appliquée sur le coton et quantité d'NPK/ha appliquée sur le coton. Les variations respectives provoquées sont de 92 et 84%. Les indices de sensibilité de cette sortie vis-à-vis des entrées sont de 6,61 et 6,21 (figure 7A et 7B). Notons sur ces mêmes figures que les sorties bilan en K sur le coton (2) et bilan en N sur le sorgho (6) ont subi l'influence respective des entrées quantité de NPK/ha sur le coton et quantité d'urée/ha sur le sorgho avec des pourcentages de variation de 27,63% et de 19,32%. Leurs IS sont respectivement de 2,54 et de -2,24. L'IS calculé après variation de l'entrée quantité d'urée sur le sorgho est négatif signifiant que l'entrée varie en sens contraire de la sortie. En effet, l'augmentation de la quantité d'urée à appliquer sur le sorgho a permis de réduire le déficit du bilan en N (très déficitaire avant la variation) sur le sorgho. L'influence des entrées « qté NPK sur coton », « qté NPK sur maïs » respectivement sur les sorties bilan en P sur le coton (3) et sur le maïs (4) est de 14,74 et de 17,16%.



1 : influence de la quantité de NPK sur le bilan en N sur le coton ; 2 : influence de la quantité de NPK sur le bilan en K sur le coton ; 3 : influence de la quantité de NPK sur le bilan en P sur le coton ; 4 : influence de la quantité de NPK sur le bilan en P sur le maïs ; 5 : influence de la quantité d'urée sur le bilan en N sur le coton ; 6 : influence de la quantité d'urée sur le bilan en N sur le sorgho.

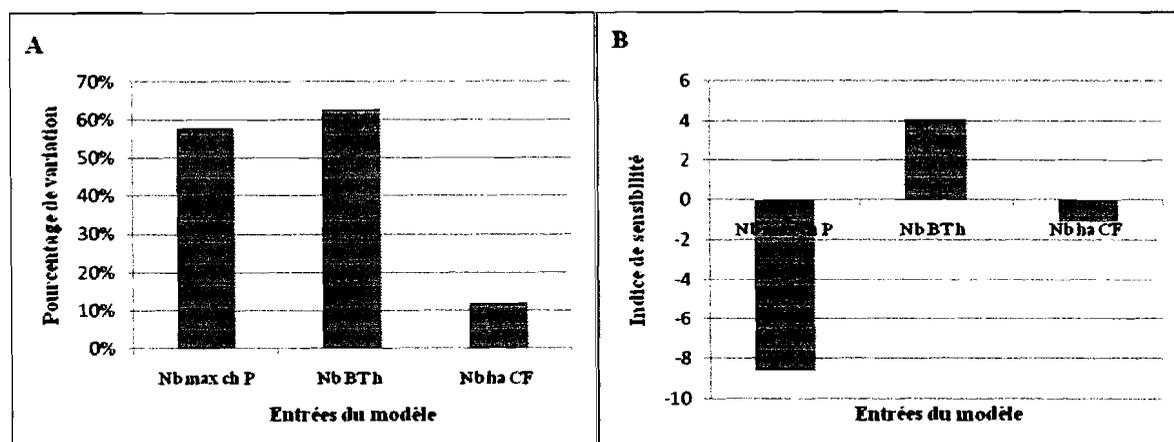
Figure 7. Pourcentage de variation (A) et IS (B) des sorties bilan en N, P, K sur coton, en P sur maïs et en N sur sorgho par rapport aux entrées

Les entrées quantité d'NPK/ha sur le coton, quantité d'urée/ha sur le coton et quantité d'urée/ha sur le sorgho doivent faire l'objet d'une grande attention lors des simulations. En effet le modèle considère une quantité moyenne d'azote exportée par tonne de coton (graine et tige) ou de sorgho (grain et paille) produite lors des simulations et lorsque les apports sont inférieurs aux exportations, cela joue sur le bilan. La variation de la sortie bilan en P est moins forte que les autres sorties (bilan en N, K) par rapport aux entrées concernées. En effet, les besoins en P du coton et du maïs sont très inférieurs aux besoins en N et K des mêmes cultures. Pieri (1989) a estimé les besoins en P du coton et du maïs respectivement à 8,2 et 8,3 kg de P/tonne de biomasse, ceux en N sont de 36,2 et 29,5 kg de N/tonne de biomasse et ceux en K de 11,7 et 32,1 kg de K/tonne de biomasse. Le faible besoin en P du coton et du maïs explique la plus faible variation des sorties bilan en P sur le coton et bilan en P sur le maïs.

3.1.3. Sensibilité de la sortie « bilan en UF pour le nombre d'animaux choisi et pour la saison sèche chaude »

Les entrées nombre de bovins de trait au début de l'hivernage et nombre maximum de charrettes (petit plateau) de paille que l'exploitant peut stocker (Nb max ch P) apparaissent comme celles pouvant influencer significativement la sortie « bilan en UF pour le nombre d'animaux choisi et pour la saison sèche chaude ». Elle accuse des variations respectives de 62,84% et 58% et des IS respectifs de 4,07 et -8,59 (figure 8A et 8B). A remarquer que l'IS calculé après variation de « Nb max ch P » est négatif ce qui indique que l'entrée varie en sens inverse de la sortie. En effet, l'augmentation de la quantité de paille à stocker a entraîné une diminution du déficit initial du bilan en UF avant la variation de l'entrée. L'entrée nombre d'hectares de culture fourragère « Nb ha CF » influence de façon moindre la sortie « bilan en UF pour le nombre d'animaux choisi et pour la saison sèche chaude ». En effet, on a

obtenu une variation de 12,25% et un IS égale à -1,09. Cette entrée varie en sens inverse par rapport à la sortie car une augmentation de la superficie en culture fourragère entraîne une diminution du déficit initial du bilan en UF avant la variation.



Nb max ch P : nombre maximum de charrette (petit plateau) de paille que l'exploitant peut stocker ; Nb BT h : nombre de bovin de trait au début de l'hivernage ; Nb ha CF : nombre d'ha de cultures fourragères.

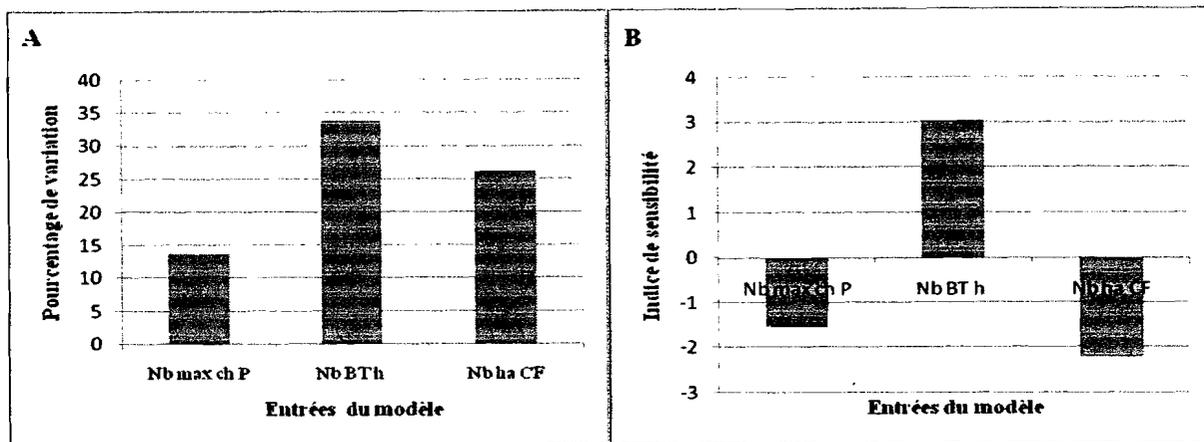
Figure 8. Pourcentage de variation de la sortie bilan en UF par rapport aux entrées (A). IS de la sortie bilan en UF par rapport aux entrées (B).

Dans les simulations réalisées pour cette analyse de sensibilité, seuls les bovins de trait et d'embouche reçoivent une complémentation de leur ration durant la saison sèche chaude. Chaque bovin de trait exige une certaine quantité d'UF par jour. En diminuant ou en augmentant le nombre de bovins de trait, on aura une variation positive ou négative de la demande en UF. L'offre en UF étant inchangée, cela va contribuer à creuser ou non l'écart au niveau du bilan en UF. Aussi la quantité maximale de paille que l'exploitant peut stocker peut être un facteur limitant à la réalisation de stocks fourragers. En faisant varier ce facteur cela entraîne une variation de l'offre en UF dans l'exploitation entraînant du même coup une variation assez importante du bilan en UF car la demande restera inchangée. La superficie allouée aux cultures fourragères pour cette simulation était de 0,5 ha. Sa variation de + ou - 10% reste faible (en termes de quantité en UF) mais entraîne néanmoins une variation de + de 10% du bilan en UF ; une attention particulière doit donc également être accordée à cette entrée lors des différentes simulations.

3.1.4. Sensibilité de la sortie « bilan en MAD pour le nombre d'animaux choisi et pour la saison sèche chaude »

Cette sortie est sensible aux entrées nombre de bovins de trait au début de l'hivernage, nombre d'ha de cultures fourragères et nombre maximum de charrettes (petit plateau) de paille que l'exploitant peut stocker. Leur pourcentage de variation au niveau de la sortie est respectivement de 33,94, de 26,22 et de 13,8% (figure 9A). La sensibilité de cette sortie vis-à-vis de ces entrées se traduit par des IS respectifs de 3,06, de -2,2 et de -1,55 (figure 9B). Les

IS des entrées « Nb ha CF » et « Nb max ch P » sont négatifs traduisant ainsi une variation en sens inverse entre les entrées et les sorties. En effet, le bilan en MAD avant les simulations était très déficitaire et en augmentant la superficie des cultures fourragères ou la quantité de paille cela entraîne une diminution du déficit du bilan car l'offre en MAD augmente.



Nb max ch P : nombre maximum de charrette (petit plateau) de paille que l'exploitant peut stocker ; Nb BTh : nombre de bovin de trait au début de l'hivernage ; Nb ha CF : nombre d'ha de cultures fourragères.

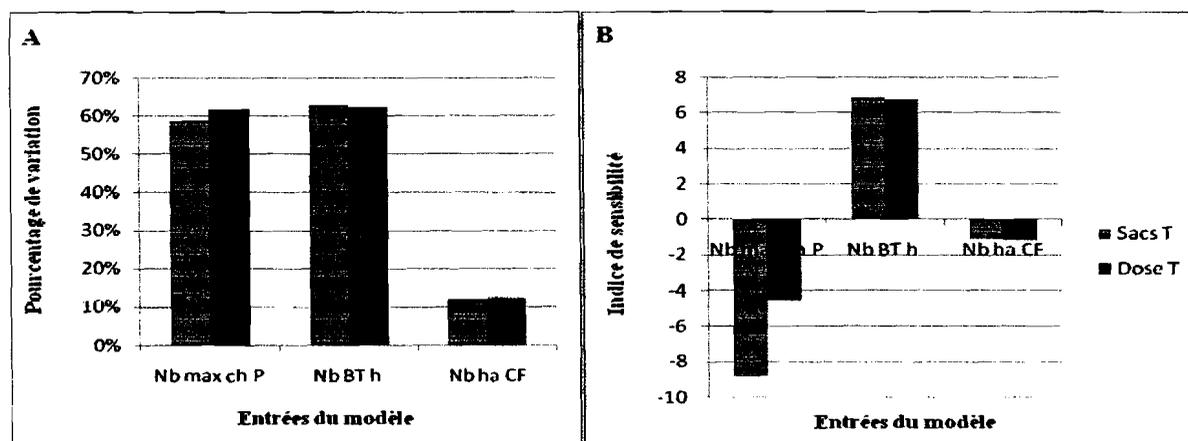
Figure 9. Pourcentage de variation de la sortie bilan en MAD par rapport aux entrées (A). IS de la sortie bilan en MAD par rapport aux entrées (B).

Tout comme la paille, les cultures fourragères ont une valeur fixe en MAD que le modèle considère pour les différentes simulations. Dans un kg de matière sèche de fanes de niébé, cette valeur a été estimée à 86 g MAD (Schaller, 2008). Il faut signaler que dans le modèle, les fanes des cultures fourragères sont ramassées dans leur quasi-totalité et estimées en MAD. En faisant varier le nombre d'ha en cultures fourragères (ou le Nb max ch P), cela va influencer l'offre en MAD au sein de l'exploitation et entrainera du même coup une variation significative du bilan en MAD puisque la demande reste inchangée. On remarque aussi que, contrairement à ce qui avait été observé pour le bilan UF, le nombre d'ha en cultures fourragères a une influence plus marquée sur le bilan en MAD que le Nb max ch P. En effet, la valeur en MAD des cultures fourragères dépasse celle de la paille de céréale. Pour ce qui est du nombre de bovins de trait, une augmentation du nombre de têtes engendre une augmentation de la demande en MAD. On aura ainsi une variation significative du bilan en MAD car l'offre en MAD reste inchangée.

3.1.5. Sensibilité de la sortie nombre de sacs de tourteaux de coton à acheter et dose de tourteau à distribuer par jour pendant la saison sèche chaude

Les figures 10A et 10B montrent que « Nb BTh » et « Nb max ch P » sont les entrées les plus importantes en ce qui concerne les sorties « nombre de sacs de tourteaux de coton à acheter pour compléter le nombre d'animaux choisis pendant la saison sèche chaude » et « dose de tourteaux de coton à distribuer par jour et par animal pendant la saison sèche chaude ».

L'entrée « Nb BTh » donne une variation de 63,26% et 62,50% respectivement pour les deux sorties. Leurs IS sont respectivement de 6,9 et de 6,81. L'entrée « Nb max ch P » a donné respectivement pour les deux sorties une variation de 59% et 62%. Leurs IS sont respectivement de -8,8 et -4,5. On note que l'IS calculé après variation de l'entrée « Nb max ch P » est négatif au niveau des deux sorties signifiant que l'entrée varie en sens inverse de la sortie. En effet, pour une augmentation de la quantité de paille on aura une diminution du nombre de sacs de tourteaux à acheter et de la dose de tourteaux à distribuer due à l'augmentation de l'offre en UF et MAD.



Nb max ch P : nombre maximum de charrette (petit plateau) de paille que l'exploitant peut stocker ; Nb BT h : nombre de bovin de trait au début de l'hivernage ; Nb ha CF : nombre d'ha de cultures fourragères.

Figure 10. Pourcentage de variation (A) et IS (B) de la sortie nombre de sacs de tourteaux de coton à acheter et dose de tourteaux à distribuer par rapport aux entrées.

La dose de tourteaux de coton à distribuer par jour et par animal pendant la saison sèche chaude est le ratio entre le nombre de sacs de tourteaux de coton à acheter pour compléter le nombre d'animaux choisis pendant la saison sèche chaude et leur effectif. Elle dépend donc du nombre de sacs de tourteaux à acheter. Lors de la simulation, le modèle calcule un nombre de sacs à acheter au cas où le stock de paille et de fane ne permette pas de couvrir les besoins des animaux choisis pour recevoir la complémentation de leur ration. Ainsi, une variation positive du nombre de bovins de trait au début de l'hivernage va influencer négativement sur les bilans en UF et en MAD. Le déficit sera comblé par l'achat d'un nombre de sacs de tourteaux pour compléter le nombre d'animaux choisis pendant la saison sèche chaude. Ce qui explique donc la forte variation de cette sortie par rapport à l'entrée « Nb BTh » qui, à son tour a entraîné une variation significative de la sortie dose de tourteaux à distribuer. Au niveau des figures 8 et 9, l'entrée « Nb max ch p » a influencé significativement les sorties bilan en UF et bilan en MAD. Par conséquent l'entrée influence également le nombre de sacs de tourteaux de coton à acheter et la dose de tourteaux à distribuer pendant la saison sèche chaude.

3.1.6. Sensibilité de la sortie bilan céréalier

La variation (de + 10 %) de l'entrée nombre d'hectare de maïs a entraîné une variation de 11,4 % au niveau de la sortie bilan céréalier. Son indice de sensibilité a été de 1,1. Cette variation significative de la sortie bilan céréalier est due à l'augmentation du stock céréalier causée par l'accroissement de la superficie en maïs car les besoins en céréales de la famille n'ont pas varié.

3.1.7. Conclusion partielle

Cette analyse de la sensibilité montre que lors des simulations, une attention particulière doit être accordée à un certain nombre d'entrées du modèle car elles peuvent avoir une influence importante sur les sorties du modèle. Il s'agit du « Nb ha maïs », de la « Qté NPK m », de la « Qté urée m », du « Nb ch FO », du « Nb max ch P », du « Nb BTh », du « Nb ha CF », de la « Qté NPK/ha sur coton », de la « Qté urée/ha sur coton », de la « Qté urée sur sorgho/ha ». Pour cette analyse de sensibilité, l'influence de 39 entrées du modèle sur les sorties a été testée. C'est donc 26% des entrées testées qui influe de façon significative sur les sorties du modèle. Le modèle calcule un certain nombre d'équilibres entre offre et demande de ressources établis à partir de la littérature et par conséquent lorsque les entrées engendrent des déséquilibres cela peut engendrer d'importantes variations au niveau des sorties.

La variation des entrées n'a pas influencé significativement les sorties du module économique. En effet, dans le module économique plusieurs facteurs sont pris en compte dans le calcul du solde économique et la variation (de + ou - 10%) d'un seul facteur n'influence pas significativement le solde. Ainsi, dans le cadre de cette étude, les résultats obtenus donnent une idée assez claire sur les entrées du modèle. Ces résultats peuvent guider ou renseigner les futurs utilisateurs du modèle lors des différentes simulations avec les producteurs.

3.2. Validation du modèle

3.2.1. Validation du module système de culture

3.2.1.1. Comparaison de la production en grain/paille mesurée à celle simulée (Koumbia)

Le tableau V présente les valeurs des indices statistiques obtenues en faisant la comparaison entre les données de production en grain mesurées sur le terrain et celles simulées. Dans l'ensemble, la NRMSE s'éloigne de la valeur optimale (0%) et seule l'EF de la production en sorgho grain (Prod sg) tend vers la valeur optimale. On note aussi à travers r que les

rendements de coton, maïs et sorgho grain sont fortement corrélés linéairement aux rendements simulés. Le CRM est négatif au niveau de la Production de cultures secondaires et positif sur les autres productions.

Tableau V : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes productions en grain (Koumbia)

Indices	Prod cg	Prod mg	Prod sg	Prod csg	Valeur optimum
Nb P	9	13	8	7	-
M mesurée	3213	8203	2756	294	-
M simulée	2583	7769	2437	545	-
NRMSE	60%	69%	95%	160%	0%
EF	0,53	0,03	0,76	-3,18	1
CRM	0,19	0,05	0,11	0,84	0
r	0,82	0,81	0,96	0,69	1
signification r	FC	FC	TFC	MC	-

Prod : production ; Nb P : Nombre de parcelle ; M : moyenne ; cg : coton graine ; mg : maïs grain ; sg : sorgho grain ; csg : culture secondaire grain.

Les indices statistiques à travers la NRMSE et l'EF (tableau V) montrent que les productions simulées s'éloignent de celles mesurées. En effet, pour qu'une donnée simulée soit conforme à une donnée mesurée il faudra avoir simultanément une NRMSE proche de la valeur optimum (0%) et une EF proche de 1. On note à travers le CRM une sous-estimation des productions en coton, maïs et sorgho grain simulées par rapport à celles mesurées. Le modèle surestime la production en cultures secondaires représentées ici par le niébé. La sous estimation des productions en grain de coton, maïs et sorgho peut s'expliquer par le fait que le modèle ne prend pas en compte l'apport des fertilisants organiques et minéraux dans l'élaboration des rendements. Hors, les rendements en milieu réel diffèrent généralement d'un producteur à un autre en fonction des itinéraires techniques et des modes de gestion des assolements. Hypothèse qui a fait l'objet d'une vérification par plusieurs auteurs dont Sedogo (1981), Koulibaly (1992), Ahn (1993), Dakouo *et al.* (1995) et Bado (2002). Cette situation a été constatée au niveau du village de Koumbia car les rendements ont varié entre producteurs en fonction des itinéraires techniques. Pour ce qui est du niébé, la surestimation de la production par le modèle est due essentiellement à la pluviométrie. En effet, au moment de la maturité du niébé, on a enregistré d'importantes averses au niveau du village causant ainsi des pertes de rendement en niébé. On note par contre une bonne corrélation linéaire entre les données simulées et celles mesurées. En effet, cet indice ne nous permet pas de dire que le modèle simule finement les sorties mais il montre qu'il existe une bonne liaison entre les données simulées et celles mesurées.

Les productions de paille et fanes obtenues ont fait l'objet d'une comparaison avec celles obtenues par simulation. Le tableau VI montre les valeurs des indices statistiques obtenues. On remarque que la NRMSE s'éloigne de la valeur optimale au niveau des 3 productions en paille de maïs, sorgho et fanes de niébé, l'EF est proche de 1 au niveau des productions en paille de maïs et sorgho. Les productions en paille de maïs et sorgho simulées sont très fortement corrélées linéairement aux productions mesurées. Le CRM est négatif au niveau de la production en fanes de niébé.

Tableau VI : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes productions en paille/fanes (Koumbia)

Indices	Prod mp	Prod sp	Prod csf	Valeur optimum
Nb P	13	8	7	-
M mesurée	10788	10135	484	-
M simulée	10488	9750	973	-
NRMSE	44%	76%	227%	0%
EF	0,77	0,82	-6,19	1
CRM	0,02	0,03	-1,03	0
r	0,93	0,96	0,07	1
signification r	TfC	TfC	TfC	-

mp : maïs paille ; sp : sorgho paille ; csf : culture secondaire fanes.

Les productions en paille de maïs, sorgho et fanes de niébé simulées sont différentes de celles mesurées car leurs indices statistiques (NRMSE et EF) s'éloignent de leurs valeurs optimales. Les valeurs positives du CRM obtenues montrent une sous-estimation de la production en paille par le modèle. Cette sous-estimation est la conséquence de la sous estimation de la production en grain par le modèle. En effet, le modèle simule la production en paille en fonction de la production en grain. Donc pour un rendement en grain donné, on aura un rendement proportionnel en paille. Le coefficient de corrélation nous indique que les données sont fortement liées aux données mesurées.

3.2.1.2. Comparaison de la production en grain/paille mesurée à celle simulée (Kourouma)

Les NRMSE de toutes les productions dans le village de Kourouma sont éloignées de la valeur optimale (tableau VII). Seule l'EF de la production en grain de maïs tend vers la valeur optimale. On note une très forte corrélation linéaire entre les productions en grain de coton, maïs et niébé simulées par rapport à celles mesurées. Le CRM est négatif au niveau de la production en grain de niébé.

Tableau VII : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes productions en grain (Kourouma)

Indices	Prod cg	Prod mg	Prod sg	Prod csg	Valeur optimum
Nb P	9	12	6	7	-
M mesurée	9854	19194	1340	243	-
M simulée	6972	13216	1250	350	-
NRMSE	61%	73%	62%	144%	0%
EF	0,58	0,66	0,36	0,28	1
CRM	0,29	0,31	0,06	-0,61	0
R	0,91	0,93	0,69	0,96	1
signification r	TFC	TFC	MC	TFC	-

Prod : production ; Nb P : Nombre de parcelle ; M : moyenne ; cg : coton graine ; mg : maïs grain ; sg : sorgho grain ; csg : culture secondaire grain

Nous avons quasiment le même scénario qu'à Koumbia. Les données simulées sont différentes des données mesurées car la NRMSE et l'EF de la production en grain s'éloignent de leurs valeurs optimales. Le r par contre, au niveau des productions en grain de coton, maïs et sorgho montre que les données simulées sont corrélées linéairement aux données mesurées. Mais les données simulées sont dans l'ensemble sous estimées par rapport aux données mesurées car leurs CRM sont positifs. Cette sous-estimation avait été expliquée au niveau de la section 3.2.1.1 par la variabilité des itinéraires techniques entre producteurs.

Le tableau VIII présente les valeurs des indices statistiques calculées entre les productions en paille et fanes simulées et celles mesurées à Kourouma. Les NRMSE de la production en paille et de celle en fanes sont éloignées de la valeur optimale. L'EF de la production en paille de sorgho et de la production en fanes de niébé sont respectivement de 0,38 et de -1,29. Elles sont donc très inférieures à la valeur optimale. On note une forte corrélation (0,9) et une très forte corrélation (0,99) respectivement au niveau de la production en paille de maïs et de celle en fanes de niébé.

Tableau VIII : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes productions en paille/fanes (Kourouma)

Indices	Prod mp	Prod sp	Prod csf	Valeur optimale
Nb P	12	6	7	-
M mesurée	29628	5129	515	-
M simulée	17842	5000	1071	-
NRMSE	69%	77%	160%	0%
EF	0,57	0,38	-1,29	1
CRM	0,39	0,02	-1,07	0
R	0,9	0,77	0,99	1
signification r	FC	FC	TFC	-

mp : maïs paille ; sp : sorgho paille ; csf : culture secondaire fanes.

Les productions en paille et fanes simulées ne sont pas conformes à celles mesurées. En effet, la NRMSE et l'EF entre les données diffèrent des valeurs optimales. Le CRM de la production en paille indique une sous-estimation des données simulées comparativement aux données mesurées. Cette sous-estimation est liée à la production en grain car la production en paille est déduite de celle en grain. Le r nous montre qu'il existe une liaison très étroite entre les productions mesurées et celles simulées.

3.2.1.3. Discussion partielle

D'après cette étude, il s'est avéré que le modèle ne prédit pas de façon adéquate les productions en grain et paille des cultures de coton, maïs, sorgho et niébé. En effet, les écarts entre les données simulées et celles mesurées sont statistiquement importants. Amas (1999), avait démontré que la validation des modèles de simulation des systèmes est très compliquée liée au fait que les données des paramètres des modèles sont rarement bien définies. Pour lui, il peut exister des hétérogénéités au niveau des données mesurées dues à la variabilité des pratiques agricoles qui ne permettent donc pas une validation concluante. D'autres auteurs (Monteith, 1996 ; Courmut, 2001 ; Woodward et Rollo, 2002 ; Cros *et al.*, 2003) ont abondé dans le même sens. Mais il faut signaler que l'objectif qui a sous tendu l'élaboration du modèle n'était pas de reproduire exactement la réalité mais de présenter des tendances de la réalité afin de susciter des discussions entre conseillers techniques et les producteurs, les forts coefficients de corrélation montre que le modèle est capable de simuler ces tendances. La production simulée est sous estimée par rapport à celle mesurée en témoigne les tableaux V, VI, VII et VIII. En effet, il est préférable d'avoir une production sous estimée par le modèle qu'une surestimation. Car une surestimation peut artificiellement entraîner des bilans céréalier ou économique positifs pouvant faussement rassurer le producteur. De plus, cette sous-estimation permettra aux futurs utilisateurs de prodiguer plus de conseils aux agriculteurs afin qu'ils puissent maximiser leur production.

3.2.2. Validation du module fertilisation

3.2.2.1. Validation des sorties quantité de fumure organique apportée et fertilisation sur les cultures

Les tableaux IX et X présentent les apports moyens simulés et mesurés de fumure organique (FO) et d'éléments minéraux sur les parcelles de coton, maïs et sorgho. Les apports d'éléments minéraux sont déduits des apports de fumures organique et minérale. Dans le

modèle, la fumure minérale est renseignée par le producteur alors que la production de FO est calculée en fonction de la production de déjections des animaux et de résidus de récoltes. Ainsi, nous allons nous focaliser sur les apports de FO.

L'erreur de prédiction (NRMSE) entre les apports de FO virtuels et réels est supérieure à 100% au niveau des cultures de coton, maïs et sorgho à Koumbia (tableau IX). A Kourouma elle est aussi supérieure à 100% entre les apports de FO virtuels et réels au niveau du maïs (tableau X). On remarque que les apports moyens par simulation de FO sur les parcelles de maïs (Koumbia et Kourouma) sont près de deux fois supérieurs à ceux mesurés expérimentalement. Les apports moyens de FO par simulation sur les parcelles de coton à Koumbia sont nuls. A Kourouma, aucune parcelle de coton et de sorgho n'a reçu de fumure organique.

Tableau IX : Apports moyens simulés et mesurés d'éléments fertilisants (Koumbia)

Cultures	Coton			Maïs			Sorgho		
	mS	mM	NRMSE	mS	mM	NRMSE	mS	mM	NRMSE
Ap (kg/ha)									
Nb P	9	9		13	13		8	8	
FO	0	422	157%	3340	1811	133%	1333	500	412%
N	30,7	35,2	20%	77,4	62	59%	18,1	12,4	233%
P ₂ O ₅	24,9	24,9	0,4%	36,4	26,5	42%	3,3	0,02	35300%
K ₂ O	15,1	15,1	0,9%	50,7	16,1	244%	7,8	0,001	18%

Ap : apport Nb P: nombre de parcelle ; Moy : moyenne ; FO : fumure organique ; mS : moyenne simulée ; mM : moyenne mesurée

Tableau X : Apports moyens simulés et mesurés d'éléments fertilisants (Kourouma)

Cultures	Coton			Maïs			Sorgho		
	mS	mM	NRMSE	mS	mM	NRMSE	mS	mM	NRMSE
Ap (kg/ha)									
Nb P	9	9		12	12		6	6	
FO	49,7	0	-	3192	1487	165%	1118	0	-
N	25,7	20,1	50%	82,5	60,3	63%	17,1	2,5	1227%
P ₂ O ₅	24,9	24,9	12%	34,2	22,9	57%	6,9	4,1	144%
K ₂ O	15,3	15,1	13%	44,7	13,8	259%	8,8	2,5	535%

L'analyse des deux tableaux montre que les apports virtuels de FO sur les parcelles de maïs et de sorgho dépassent ceux apportés sur le terrain. Dans le modèle, le producteur renseigne sur le devenir des déjections émanant de son troupeau qui peuvent soit être récoltées sous forme de poudrette de parc, de fumier de fosse ou non valorisées. La quantité de déjection dépend du nombre d'animaux présents dans l'exploitation. Ainsi, toute la production virtuelle de fumure organique (en tenant compte des pertes) est apportée en premier lieu sur les parcelles de maïs. La quantité à appliquer à l'hectare est plafonnée à 6 tonnes (dose recommandée par Berger et al. (1987) tous les 3 ans) sur les parcelles de maïs et le surplus éventuel est déversé d'abord sur le coton et ensuite sur le sorgho. Au niveau des deux

villages, aucun producteur n'a pu sur le terrain apporter les 6 tonnes par hectare de fumure organique sur les parcelles de maïs ; d'où ces apports de FO virtuelles deux fois supérieurs sur les parcelles de maïs par rapport à ceux mesurés expérimentalement. Ce constat est certainement dû à une production de fumure organique insuffisante au sein des exploitations. De plus, l'apport de fumure organique n'est pas systématiquement reparti sur l'ensemble des parcelles de maïs de l'exploitation. En effet, l'apport systémique de la FO sur les parcelles de cultures dans les villages est conditionné d'une part par sa disponibilité en quantité suffisante et d'autre part par la disponibilité de la main d'œuvre et des moyens de transport de l'exploitation.

Il est à noter que le modèle simule bien l'apport privilégié de la FO sur le maïs même s'il surestime cet apport. Pour élaborer le premier prototype du modèle, Schaller (2008), a identifié parmi les règles de décision des producteurs de Koumbia, que la FO (stock de fumier et de déjection) était appliquée en premier lieu sur les parcelles de maïs. Cette règle a été vérifiée dans notre étude car tous les producteurs des deux villages disposant de FO, l'ont d'abord appliqué sur les parcelles de maïs ensuite sur les autres parcelles (qui seront destinées pour les cultures de coton, sorgho). Par voie de conséquence, les quantités mesurées de FO sur les parcelles de coton et sorgho dans les deux villages sont faibles voire nulles.

Le calcul des apports par le modèle permet au producteur d'estimer la quantité de FO qu'il pourra obtenir lorsque le troupeau et les déjections émanant de ce troupeau sont gérés de façon plus rationnelle.

3.2.2.2. Validation de la sortie bilan minéral

Les tableaux XI et XII présentent les indices statistiques calculés pour les bilans minéraux mesurés et simulés dans les villages de Koumbia et Kourouma. La comparaison des bilans minéraux mesurés (N, P_2O_5 et K_2O) des précédents coton, maïs et sorgho à ceux simulés n'a pas révélé de conformité entre eux. Le NRMSE et l'EF s'éloignent de leurs valeurs optimales. Seuls les bilans en P_2O_5 du précédent coton à Koumbia et du précédent sorgho à Kourouma sont moyennement corrélés.

Tableau XI : Valeurs des indices statistiques calculés pour les différents bilans minéraux (Koumbia)

Cultures	Coton			Maïs			Sorgho		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Indices									
Nb P	9	9	9	13	13	13	8	8	8
mM (kg/ha)	665,1	-0,16	-0,76	768,3	9,41	-27,1	570,2	-3,94	-64,6
mS (kg/ha)	-10,7	15,5	1,76	22,4	20,9	-9,1	-14,5	-9,8	-32,6
NRMSE (%)	115	-10375	-5432	126	248	-538	226	-307	-379
EF	-3,28	-33,3	-0,15	-1,41	-1,28	-0,01	-0,22	-1,61	0,01
CRM	1,01	96,6	3,3	0,97	-1,22	0,06	1,02	-1,49	0,49
r	0,14	0,6	-0,64	0,06	-0,12	0,07	0,44	-0,13	0,28
signification r	TfC	MC	NC	TfC	NC	TfC	fC	NC	TfC

Tableau XII : valeurs des indices statistiques calculés pour les différents bilans minéraux (Kourouma)

Cultures	Coton			Maïs			Sorgho		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Indices									
Nb P	9	9	9	12	12	12	6	6	6
mM (kg/ha)	516,9	5,34	-0,89	807,7	24,73	76,1	832,8	-7,68	-73,5
mS (kg/ha)	-15,7	15,51	1,96	27,5	18,81	-14,9	-27,78	-8,05	-36,6
NRMSE (%)	131	282	-15842	124	155	331	110	-133	-358
EF	-1,61	-3,00	0,01	-1,63	-0,13	-0,23	-7,37	0,04	-0,005
CRM	1,03	-1,9	3,1	0,96	0,23	1,19	1,03	-0,04	0,5
r	-0,13	0,09	0,26	-0,27	-0,04	-0,41	-0,30	0,52	0,27
signification r	NC	TfC	TfC	NC	NC	NC	NC	MC	fC

mM : moyenne mesurés ; mS : moyenne simulée ; Nb P : nombre de parcelle

Les bilans minéraux mesurés expérimentalement d'après les deux tableaux (XI et XII) s'éloignent de ceux obtenus par simulation. Les bilans azotés réels sont globalement supérieurs aux bilans virtuels. Le modèle calcule les exportations d'éléments minéraux par les cultures en fonction d'une production moyenne de biomasse par culture que multiplie un besoin en élément par tonne de biomasse. Cette production qui est de 1,146 tonne/ hectare pour le coton, 1,865 tonne/ hectare pour le maïs et 1,055 tonne/ hectare pour le sorgho est en deçà de celle mesurée expérimentalement pour le coton et le maïs (1,27 tonne/ hectare pour le coton, 2,75 tonne/ hectare pour le maïs et 0,9 tonne/ hectare pour le sorgho). Par conséquent les exportations de biomasse simulées sont potentiellement inférieures aux exportations réelles. Les tableaux IX et X ont mis en évidence des apports de FO simulés globalement supérieurs à ceux mesurés expérimentalement pour le maïs. Le fait que les bilans minéraux réels diffèrent des bilans virtuels peut alors s'expliquer par un problème de paramétrage au niveau de la teneur en éléments minéraux de la biomasse cultivée ou de la fumure organique ou une non prise en compte par le modèle de certains apports ou exportations d'éléments

minéraux. Bien qu'ils soient difficiles à évaluer, plusieurs auteurs dont Piéri (1989), Sedogo (1993) soutiennent que les pertes (par érosion, par lessivage ou lixiviation, pertes gazeuses, etc.) et les gains (par les dépôts atmosphériques, fixation biologique, etc.) sont non négligeables. Des bilans positifs en azote ont été observés sur certaines parcelles n'ayant pas reçu de fumure organique ni minérale. Ces bilans positifs en azote peuvent être imputables au gain d'azote par pluies atmosphériques ou par entraînement sur les parcelles d'engrais par les eaux de pluies, ou même par les fèces d'animaux externes laissées sur les parcelles en saison sèche durant la vaine pâture. En outre la minéralisation progressive de la matière organique dans le temps après deux ou trois ans d'apport de fumure organique peut expliquer ces bilans. Knoden et *al.* (2007) ont attesté que la totalité de l'azote présente dans la matière organique n'est pas directement valorisable par les plantes l'année de l'épandage. Aussi plusieurs auteurs (Dakuo, 1991 ; Hien et *al.* 1992 ; Sedogo, 1993) ont montré que la minéralisation de la matière organique libère progressivement des éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore etc. qui enrichissent le pool minéral du sol.

3.2.2.3. Conclusion partielle

Les tableaux IX, X, XI et XII ont montré que les sorties simulées par le modèle ne corroborent pas les données mesurées expérimentalement. Les apports de FO simulés par le modèle au niveau des parcelles de maïs sont pour la plupart supérieurs aux apports réels. Aussi les bilans minéraux simulés par le modèle diffèrent de ceux mesurés expérimentalement. Dans l'ensemble (module fertilisation), les sorties simulées par le modèle s'éloignent de la réalité et mettent en évidence un probable problème de paramétrage. Néanmoins le modèle permet de mettre en évidence les déséquilibres entre importations et exportations à l'échelle de l'exploitation qui peuvent à moyen terme, si ils ne sont pas compensés par des sources externes d'éléments minéraux (vaine pâture...) entraîner une baisse de la fertilité des sols. En ce qui concerne les apports de FO, le modèle reste un bon outil de conseil car il permet aux producteurs de connaître le potentiel de production de fumure organique de leur exploitation lorsque le troupeau est géré de façon plus rationnelle et par là de voir l'impact potentiel sur les bilans minéraux.

3.2.3. *Validation du module économique (charges liées à l'agriculture)*

3.2.3.1. Comparaison des charges économiques mesurées à celles simulées (Koumbia/ Kourouma)

Les tableaux XIII et XIV présentent les indices statistiques obtenus en faisant la comparaison entre les charges simulées à celles mesurées. Les NRMSE, les EF et les CRM des charges

liées aux herbicides, insecticides et charges totales sont très proches de leurs valeurs optimales (respectivement 0%, 1 et 0). On note aussi une très forte corrélation entre les données simulées et celles mesurées car le r est quasiment égale à la valeur optimale au niveau des trois charges.

Tableau XIII : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes charges économiques liées à l'agriculture (Koumbia)

Indices	Ch herbi	Ch Insect	Ch T	Valeur optimum
Nb P	14	14	14	
M mesurée	100 976	660 467	395 477	
M simulée	102 081	659 984	396 110	
NRMSE	4%	1%	3%	0%
EF	0,99	0,99	0,99	1
CRM	-0,01	0,0007	-0,0016	0
r	0,99	0,99	0,99	1
signification r	TFC	TFC	TFC	

Ch : charges ; herbi : herbicide ; insect : insecticide ; T : totale

Tableau XIV : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes charges économiques liées à l'agriculture (Kourouma)

Indices	Ch herbi	Ch Insect	Ch T	Valeur optimum
Nb P	12	12	12	
M mesurée	115 133	597 036	687 092	
M simulée	116 479	599 196	695 530	
RMSE	4%	0,3%	4%	0%
EF	0,99	0,99	0,99	1
CRM	-0,011	0,002	-0,012	0
r	0,99	1	0,99	1
signification r	TFC	TFC	TFC	

Ch : charges ; herbi : herbicide ; insect : insecticide ; T : totale

L'analyse des tableaux XIII et XIV à travers les indices statistiques nous permet d'affirmer que les charges simulées par le modèle sont en accord avec celles mesurées. On note une très petite surestimation des charges liées à l'achat des herbicides ce qui a engendré une légère surestimation au niveau des charges totales.

3.2.3.2. Conclusion partielle

L'analyse des tableaux XIII et XIV nous permet de conclure que les charges économiques simulées liées à l'agriculture sont semblables à celles mesurées. En effet, les charges ne sont pas réellement simulées mais simplement rentrées par l'utilisateur au niveau du modèle à partir des cahiers de suivi, ce qui explique cette forte correspondance entre les données

simulées et mesurées. Mais on a noté une petite surestimation (négligeable) des charges liées à l'achat des herbicides et charges totales par le modèle. En effet, avant les simulations, certains paramètres (comme les prix d'achat des herbicides) ont été mis à jour au niveau du modèle, mais très souvent pour un même produit herbicide et pour un même producteur le prix d'achat peut varier en fonction du type de spéculation et de la période d'achat. Ce qui ne permet pas en conséquence d'obtenir une égalité entre les charges simulées et celles réelles. Nous nous sommes limités aux charges liées à l'agriculture car l'évaluation réelle du produit brut chez les producteurs n'a pas pu être effectuée. En effet, les ventes réelles des productions agricoles par les producteurs sont échelonnées tout au long de l'année ce qui rend difficile leur évaluation pratique au jour le jour. De plus le gain économique lié à la production de coton graine n'est pas versé aux producteurs immédiatement après la campagne hivernale. Ce qui a amené à ne comparer que les charges simulées/mesurées liées à l'agriculture.

3.3. Discussion générale

3.3.1. Sensibilité du modèle

Les résultats de l'analyse de sensibilité ont montré que le modèle est sensible à la variation de certaines entrées (Nb ha maïs, Qté NPK m, Qté urée m, Nb ch FO, Nb max ch P, Nb BTh, Nb ha CF, Qté NPK/ha sur coton, Qté urée/ha sur coton et Qté urée sur sorgho) du modèle. En effet, dans le modèle certaines entrées sont utilisées comme paramètres intermédiaires pour le calcul de plusieurs sorties. En exemple, l'entrée nombre maximum de charrettes (petit plateau) de paille que l'exploitant peut stocker (Nb max ch P) traduit la capacité réelle de stockage de paille de l'exploitation compte tenu des contraintes de main d'œuvre et de transport. La quantité de résidus récoltés (entrée du module ration) est modulée par Nb max ch P puis convertie en unité fourragère et interagit avec l'entrée nombre de bovins (trait ou embouche) recevant une complémentation de leur ration. L'ensemble des deux entrées va permettre de calculer les sorties « bilan en UF pour le nombre d'animaux choisi et pour la saison sèche chaude », « bilan en MAD pour le nombre d'animaux choisi et pour la saison sèche chaude », « nombre de sacs de tourteaux de coton à acheter pour compléter le nombre d'animaux choisis pendant la saison sèche chaude » et « dose de tourteaux de coton à distribuer par jour et par animal pendant la saison sèche chaude ».

Il convient de souligner que l'ensemble des entrées du modèle n'a pas pu être testé car la méthode d'analyse (variation de + ou - 10% des entrées) ne permettait pas la prise en compte des entrées qualitatives (devenir des déjections, lots d'animaux recevant une complémentation de leur ration) et de celles qui sont égales à 0. Néanmoins, sur un total de 39 entrées testées,

26% ont entraîné des variations significatives au niveau des sorties concernées. Le fait que les processus soient simulés à partir d'équations simples utilisant 2 ou 3 variables explique vraisemblablement cette forte sensibilité du modèle. Il était vraiment primordial d'appréhender les entrées qui peuvent, de part leur modification, influencer significativement certaines sorties du modèle. Saltelli et *al.* (1996), pour abonder dans le même sens, ont affirmé que pour évaluer la cohérence entre le modèle et le système qu'il représente, il est important pour l'utilisateur du modèle de chercher à savoir et comprendre comment réagit son modèle vis-à-vis de ces données d'entrées. Ces résultats vont permettre aux futurs utilisateurs de savoir que d'un scénario à un autre, on peut avoir des sorties très contrastées qu'il faudra analyser finement avec le producteur mais qui auront le mérite de susciter la discussion.

3.3.2. Validation

Savary (1994), a montré que les systèmes agricoles sont d'une complexité telle qu'il est impossible d'envisager dans le cadre d'un modèle de prendre en compte toutes les relations existantes. Ainsi, dans notre étude, certains facteurs non pris en compte par le modèle peuvent expliquer les différences constatées entre données réelles et virtuelles. Dans le module système de culture, les productions en grain et paille de maïs, coton et sorgho mesurées expérimentalement sont supérieures à celles simulées. Cette situation est vraisemblablement liée aux pratiques de fertilisation organique et minérale sur les cultures non prises en compte au niveau du modèle dans le calcul des rendements. Aussi, d'autres facteurs (abiotique et biotique) ont pu influencer négativement ou positivement la production agricole dans les deux villages de l'étude.

Dans le module fertilisation, les apports virtuels de fumure organique et d'éléments minéraux sur les parcelles de culture se sont éloignés de la réalité. Aussi au niveau des bilans minéraux, plusieurs facteurs (abiotiques et biotiques) non pris en compte par le modèle ont pu contribuer à creuser l'écart entre les bilans minéraux virtuels et ceux mesurés expérimentalement de même qu'un mauvais paramétrage pour le calcul des exportations et importations des éléments minéraux.

Au niveau du module économique, seules les charges liées à l'agriculture ont été considérées et les résultats ont montré que les charges simulées étaient conformes à celles notifiées par les producteurs.

Au regard de nos résultats, il convient de revenir sur le contexte et l'objectif majeur de la conception du simulateur. En effet, le simulateur a été conçu pour servir d'outil de conseil et d'aide à la décision. L'objectif n'est donc pas de reproduire exactement la réalité mais de

présenter des tendances engendrées par la modification des pratiques pouvant faire l'objet de discussion entre les utilisateurs (conseillers agricoles) et les producteurs. Chatelin et *al.* (1994), dans leur étude sur la modélisation du fonctionnement de l'agrosystème, mentionnent qu'il est nécessaire de disposer d'outils d'aide à la décision mais qu'il est plus efficace, d'aider l'acteur à se construire sa solution plutôt que de lui fournir une seule stratégie, fut-elle théoriquement optimale. Et Aubry (2007), d'insister sur le fait que la « transformation » en modèles informatisés des représentations conceptuelles des décisions n'a pas forcément pour but de « résoudre un problème », « d'aider à la décision » d'un acteur réel, mais plutôt d'aider à la réflexion sur des modifications décisionnelles. Ainsi, nous pouvons au regard du contexte dans lequel le modèle a été créé et vu les résultats de nos travaux sur les modules « systèmes de culture et économique » valider partiellement le modèle. Il peut d'ores et déjà aider les producteurs à réfléchir sur leurs stratégies de gestion de leurs exploitations et la planification de la campagne agricole. Mais il convient de souligner que des améliorations du modèle doivent être apportées pour une meilleure modélisation de la réalité. Pour ce faire, une calibration du module système de culture en trois systèmes de culture (systèmes traditionnel, semi-intensif et intensif) connus au Burkina permettra une amélioration des sorties de ce module. On pourra par exemple au niveau du module système de culture (pour chaque culture) créer une entrée pour le système intensif, une pour le semi-intensif et le reste pour le traditionnel. Au niveau du module fertilisation, les termes « quantité de FO apportée aux cultures » et « quantité d'éléments minéraux totaux apportée aux cultures » peuvent être remplacés respectivement par « quantité potentielle de FO pouvant être apportée aux cultures » et par « quantité potentielle d'éléments minéraux totaux pouvant être apportée aux cultures » afin de mieux rendre compte des types de sorties qu'engendre ce module. Aussi, pour les sorties au niveau des bilans minéraux, on peut envisager une représentation par des signes « - » les bilans négatifs et par des signes « + » les bilans positifs sans préciser de valeurs chiffrées puisque l'enjeu est d'analyser les tendances et non pas la valeur précise qui, compte tenu des simplifications est forcément erronée. Une actualisation de certains paramètres du modèle par des expérimentations à partir d'un réseau de parcelles en grandeur réelle serait nécessaire afin d'améliorer les sorties du modèle.

Pour conclure, les futurs utilisateurs du modèle doivent avoir une connaissance des différentes simplifications et limites du modèle afin de pouvoir bien analyser les sorties qui peuvent servir de support de discussion avec les producteurs cherchant à modifier leurs pratiques.

Conclusion

Les exploitations de la zone Ouest du Burkina Faso sont confrontées ces dernières années à des difficultés de gestion et de planification des activités agricoles. Difficultés nées suite à la forte croissance démographique couplée à la grande variabilité de l'environnement climatique, édaphique et économique. Pour aider les producteurs à repenser leurs pratiques, un modèle de simulation a été élaboré à partir de l'analyse des pratiques des exploitations des villages de Koumbia et Kourouma. La présente étude, avait pour objectif de vérifier la validité du modèle à travers d'une part une analyse de la sensibilité du modèle à la variation de certaines entrées et d'autre part une comparaison des sorties (des modules système de culture, fertilisation et économique) simulées à celles mesurées expérimentalement.

L'analyse de la sensibilité du modèle a révélé que la variation de 10% des entrées « nombre d'hectares de maïs/cultures fourragères », « quantité de NPK sur le maïs/coton », « quantité d'urée sur le maïs/coton/sorgho », « nombre maximum de charrettes de fumure organique que la fosse peut contenir », « nombre maximum de charrette de paille que l'exploitant peut stocker », « nombre de bovin de trait pendant l'hivernage » entraîne des variations de plus de 10% au niveau des sorties concernées. Une attention particulière doit être accordée à ces entrées lors des différentes simulations afin de pouvoir minimiser les sorties inattendues dues à la modification des entrées.

La comparaison des données simulées à celles observées a été possible grâce à des mesures réalisées dans les deux villages (Koumbia et Kourouma). Cette comparaison a révélé une différence significative entre la production simulée en grain du coton et grain/paille du maïs, du sorgho et du niébé à celle mesurée. Aussi, les apports par simulation de fumures organiques et d'éléments minéraux ainsi que les bilans minéraux simulés se sont éloignés des valeurs observées. Par contre les charges simulées liées à l'agriculture se sont révélées quasiment concordantes à celles enregistrées sur le terrain. Mais il faut noter que les productions agricoles simulées sont corrélées aux productions mesurées témoignant ainsi que le modèle est capable de rendre compte des tendances existant entre systèmes.

Le modèle peut être validé comme outil de réflexion pour la gestion de leurs exploitations par les producteurs. Mais avant d'être mis à la disposition des utilisateurs il faut que certaines améliorations soient apportées et que les utilisateurs soient informés sur ses simplifications, sa sensibilité et ses limites.

Au terme de notre analyse et à la lumière des résultats obtenus, nous pouvons formuler quelques recommandations afin d'améliorer certaines sorties du modèle. (i) Pour une

meilleure simulation de la production agricole, qu'une enquête soit menée au niveau des deux villages afin de déterminer les différentes productions agricoles fonction du système de culture (systèmes traditionnel, semi-intensif et intensif) appliqué ; (ii) une modification des valeurs des paramètres du module fertilisation devra être apportée à partir d'une analyse de la littérature ou de nouvelles expérimentations de terrains (iii) Une introduction d'une relation entre les bilans minéraux et la production agricole simulée permettra de mieux prendre en compte les différentes exportations d'éléments minéraux par les cultures.

Cette étude permet donc non seulement d'analyser la validité du modèle mais aussi de définir comment faire évoluer le modèle ou d'aider le futur utilisateur à mieux connaître les limites du modèle pour mieux en analyser les sorties lors des simulations avec les producteurs.

Références Bibliographiques

- Adden A.K., 2005.** Estimation des besoins en N, P et K du basilic (*Ocimum basilicum L.*) par le module DSSB et gestion optimale de N dans la Région Maritime du Togo. Mémoire d'ingénieur Agronome. Université de Lomé, 66 p.
- Addiscott T.M. and Whitmore A.P., 1987.** Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn, winter and spring. *J. Agric. Sci. (Cambr.)*, 109: pp 141-157.
- Ahn P.M., 1993.** Tropical soil and fertiliser use. Intermediate tropical- Agriculture series, 252 p
- Amas., 1999.** Crop modelling/ Simulation: An overview. Mauritius Sugar Industry Research Institute. B F Cheeroo-Nayamuth, pp 11-26.
- Andrieu N., 2004.** Diversité du territoire de l'exploitation d'élevage et sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques: étude empirique et modélisation. Paris, thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 258 p.
- Andrieu N., Dugue P., Le Gal P.Y. et Schaller N., 2009.** Modéliser le fonctionnement d'exploitations agricoles de polyculture élevage pour une démarche de conseil. Cas de la zone cotonnière de l'ouest du Burkina Faso. *In* : Colloque/ Savanes africaines en développement : innover pour durer. Garoua - Cameroun, 20-24 avril 2009, 12 p.
- Aubry C., 2007.** La gestion technique des exploitations agricoles composante de la théorie agronomique. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Institut National Polytechnique de Toulouse, 101 p.
- Bacye B., 1993.** Influence des systèmes de culture sur l'évolution du statut organique et minéral des sols ferrugineux tropicaux et hydromorphes de la zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille III. ORSTOM, Montpellier, 243 p.
- Bado B.V., 2002.** Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéennes et soudaniennes du Burkina Faso. Thèse de doctorat du troisième (3^{ème}) cycle, Université Laval du Québec, 148 p.
- Bado B.V., Lompo F. et Sedogo M.P., 1997a.** Efficacité d'un phosphatage de fond sur la productivité d'un sol ferrallitique. *In* : Gestion de la fertilité des sols dans les systèmes d'exploitation d'Afrique de l'Ouest. 4-8 mars 1997 ; pp 85-88.
- Bado, B.V., Lompo F., Sedogo M.P. et Hien, V., 2000.** Comment fertiliser les céréales à moindre coût: le Burkina phosphate comme alternative. 4^e Ed. FIRSIT, pp1-19.
- Bamba C., 2008.** Programmation d'algorithmes d'estimation et d'évaluation de modèle non-linéaire implantés sous la plate forme Record. INP-Toulouse/ENSAT/INRA, 81 p.
- Blanchard M., 2005.** Relations agriculture élevage en zone cotonnière : territoire de Koumbia et waly, Burkina Faso. Créteiln Mémoire DESS, Université Paris XII, Val de Marne, 63p + annexes.
- Bonhomme R., 1997.** Modélisation du fonctionnement d'une culture : caractérisation de la contrainte hydrique et prise en compte de ses effets. *In* : L'eau dans l'espace rural. Paris, INRA, pp 85-100.
- Bouazzama B., Xanthoulis D. et Bouaziz A., 2007.** Validation du modèle SIRMOD pour améliorer les performances de l'irrigation de la luzerne par la Robta au niveau du périmètre du Tadla. HTE (136) C, pp 8-16.
- Boyer J., 1982.** Les sols ferrallitiques Tome x. Facteurs de fertilité et utilisation des sols. Initiation-documentation technique n°52, ORSTOM-Paris, 384 p.
- Chaibou Dan Inna H., Sogli E.Y. et Sanou T.S., 2009.** Analyse de sensibilité du modèle de fonctionnement technico-économique des systèmes de production « coton céréales élevage ». *Corus 2*, 30 p.

- Chatelin M.H., Moussej T. and Papy F., 1994.** Farmers' decision making. A description approach. *In* : B.H. Jacobsen, D.E. Pedersen, J. Christensen and S. Ramunsen (éd.) : Proc. 38th EAAE Seminar, pp 369-381.
- Chevalier-Gérard C., Denis J.B. et Meynard J.M., 1994.** Perte de rendement due aux maladies cryptogamiques sur le blé tendre d'hiver. Construction et validation d'un modèle de l'effet du système de culture. *Agronomie* 14, pp 305-318.
- Coquillard P. and Hill, D.R.C., 1997.** Modélisation et simulation d'écosystèmes, des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. MASSON, 273 p.
- CORUS, 2007.** Rôle de la modélisation pour la gestion durable systèmes de production coton-céréales-élevage en Afrique de l'Ouest. Document de projet, 12 p.
- Cournut S., 2001.** Le fonctionnement des systèmes biologiques pilotés : simulation à événements discrets d'un troupeau ovin conduit en trois agnelages en deux ans, Lyon 1.
- Cros M.J., Duru M., Garcia F. and Martin-Clouaire R., 2003.** A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie* 23: pp 105-122.
- Daho B., 2006.** Dynamique des systèmes agropastoraux dans l'Ouest du Burkina Faso : cas des relations agriculture-élevage dans le terroir de Kourouma. Mémoire de fin d'études IDR/UPB, 77 p + annexes.
- Dakuo D., 1991.** Le maintien de la fertilité des sols dans les systèmes de culture conduits en motorisation intermédiaire : cas de la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso. 49 p.
- Dakuo D., Hien V. et Koulibaly B., 1995.** Gestion des résidus de récoltes dans l'intensification de la production agricole. Communication présentée à l'atelier régional sur les étables fumières en milieu paysan, du 13 au 17 Fev. 17 p
- Diallo M., 2006.** Savoirs locaux et pratiques de conduite des troupeaux au pâturage : Elaboration d'une méthode d'étude. Mémoire de DEA IDR/UPB, 70p + annexes.
- Dugue P., 1999.** Utilisation de la biomasse végétale et de la fumure animale : impacts sur l'évolution de la fertilité des terres en zone de savanes. Etude de cas au Nord-Cameroun et essai de généralisation, CIRAD-TERA N°57/99, Rapport final de l'ATP Flux de biomasse et gestion de la fertilité à l'échelle du terroir, 180 p.
- Dzotsi A.K.A., 2002.** Le Modèle CERES-Maize de DSSAT pour l'Analyse de Stratégie de Semis chez le Mais. Mémoire d'Ingénieur Agronome, IFDC Afrique/ESA –UL, 103 p.
- Felix R. et Xanthoulis D., 2005.** Analyse de sensibilité du modèle mathématique « Erosion Productivity Impact Calculator » (EPIC) par l'approche One-Factor-At-A-Time (OAT). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 9 (3), pp 179-190.
- Fox D.G., 1981.** Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 62: pp 599-609.
- Greenwood D.J., Neeteson J.J. and Draycott A., 1985.** Response of potatoes to N fertilizer: dynamic model. *Plant Soil*, 85: pp 185-203.
- Hien V., Youl S., Sanou K., Traore O. et Kabore D., 1992.** Rapport de synthèse des activités du volet expérimentation du « Engrais vivriers » 1986-1991, 184 p.
- INERA/CIRDES, 1997.** Etude des systèmes d'élevage de la zone de Sidéradougou. Rapport de recherche. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, Inera/Cirdes, 60 p.
- Jolicoeur., 2002.** Screening designs sensitivity of a nitrate leaching model (ANIMO) using a one-at-a-time method. USA: State University of New York at Binghamton, 14 p.
- Jones J.W. and Luyten J.C., 1998.** *Simulation of Biological Processes.* *In* Peart, R. M. and R. B. Curry. *Agricultural Systems Modeling and Simulation.* The University of FLORIDA, pp 19-62.

- Kleijnen J.P.C. and Sargent R.G., 2000.** A methodology for fitting and validating metamodels in simulation. *European Journal of Operational Research* 120: pp 14-29.
- Kleijnen J.P.C., 1995.** Sensitivity analysis and related analyses: a survey of statistical techniques. Netherlands: School of Management and Economics, Tilburg University, 24p.
- Knoden D., Lambert R., Nihoul P., Stilmant D., Pochet P., Cremer S. et Luxen P., 2007.** Les livrets de l'agriculture : Fertilisation raisonnée des prairies. N°15, 48 p.
- Kobayashi K. and Us Salan M., 2000.** Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal* 92 : pp 345-352.
- Koulibaly B., 1992.** Effet de la fertilisation sur l'enracinement et la nutrition minérale du cotonnier. Mémoire de Fin d'étude, diplôme d'Ingénieur, option Agronomie. Université de Ouagadougou - ISN/IDR. 113 p.
- Lhoste P., 1988.** Etude de l'élevage dans le développement des zones cotonnières. Maisons-Alfort, France, Cirad-Iemvt.
- Loague K. and Green R.E., 1991.** Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Contam. Hydrol.*, 7: pp 51-73.
- Monteith J.L., 1996.** The quest for balance in crop modeling. *Agronomy journal* 88: pp 695-697.
- N'Diaye M. et Sidibe M., 1999.** Recherche de formule d'engrais NPK économiquement rentable pour la culture du maïs pluvial dans le centre sud du Sénégal.
- Nearing A.M., Deer-Ascough L.A. and Laflen J.M., 1990.** Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Trans. ASAE* 33 (3), pp 839-849.
- Pieri C., 1989.** Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherches et de développement au sud du sahara. Ministère de la coopération française et CIRAD/TRAT (Montpellier), 444 p.
- Prost L., 2008.** Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec des futures utilisateurs : Le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR. Thèse de doctorat de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), 348 p.
- Rykiel E.J., 1996.** Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90: pp 229-244.
- Saltelli A., Tarantola S. and Chan K.P.S., 1999.** A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model-output. *Technometrics* 41 (1), pp 39-49.
- Saltelli A., Tarantola S. and Compolongo F., 2000a.** Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. *Stat. Sci.* 15 (4), pp 377-395.
- Savary S., 1994.** Système, modèle, simulation : Applications des concepts de l'analyse des systèmes en protection des cultures. Actes de séminaire international, Montpellier, pp 141-156.
- 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, 108 p.
- Sedogo M.P., 1981.** Contribution à la valorisation des résidus culturaux en sols ferrugineux et sous climat tropical semi- aride. (Matière organique du sol et nutrition azotée des cultures). Thèse Docteur-Ingénieur, INPL Nancy, 195 p.
- Sedogo M.P., 1993.** Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse d'Etat, FAST/Université nationale de Côte d'Ivoire, 345 p.
- Sinclair T.R. and Seligman N.G., 1996.** Crop modeling: from infancy to maturity. *Agronomy journal* 88: pp 698-704.
- Woodward S.J.R. and Rollo M.D., 2002.** Why pasture growth prediction is difficult. *Agronomy N.Z.* 32: pp 17-26.

ANNEXES

Annexe 1 :

Evaluation de l'intérêt d'un modèle de simulation du fonctionnement de l'exploitation comme outil d'évaluation d'innovations - Cas de l'embouche bovine

Sempore A. W.¹, Andrieu N.², Bayala I.¹, Sankara E.³

¹Centre International de Recherche-développement sur l'Élevage en zone Subhumide (CIRDES) Bobo-Dioulasso Burkina Faso, semporearistide@yahoo.fr

²CIRAD, UMR Innovation, Bobo Dioulasso, Burkina Faso ; CIRAD, UMR Innovation, Montpellier, F-34398 France; CIRDES, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

³INERA, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

Résumé:

Le projet CORUS, initié depuis 2007 au sein du Centre International de Recherche-développement sur l'Élevage en zone Subhumide (CIRDES) a pour but de co-construire avec les producteurs des outils de dialogue et de diagnostic pour mesurer les impacts de scénarios de changement sur le fonctionnement et les performances des unités de production en zone cotonnière. Dans cette optique, un modèle de simulation du fonctionnement des exploitations a été élaboré sous Excel. Une étude a été réalisée dans les villages de Koumbia et de Kourouma de l'Ouest du Burkina Faso afin de tester l'intérêt du modèle comme outil d'évaluation d'innovations telles que l'introduction d'un atelier d'embouche bovine, l'introduction d'une culture fourragère, la production de fumure organique. Cette communication présente les résultats obtenus dans le cas d'exploitations souhaitant pratiquer l'embouche. Des enquêtes et suivis ont été effectués chez 7 exploitants. Les données recueillies ont été comparées aux données simulées afin d'évaluer le réalisme des sorties du modèle. Cet outil permet non seulement aux exploitants de voir l'impact de la pratique de l'embouche avant sa mise en œuvre mais aussi d'alimenter sa réflexion sur les opportunités de telle ou telle orientation stratégique.

Mots clés : modèle, évaluation d'impact, embouche bovine, exploitation agricole, Burkina Faso

1. Introduction

L'innovation dans le secteur agricole est perçue comme une nouvelle idée, méthode pratique ou technique qui permet d'accroître de manière durable la productivité et le revenu agricole des exploitations (Adams, 1982). Une innovation n'intéresse que si elle répond à un besoin ressenti. Or la recherche a souvent ignoré les savoirs locaux ou les règles de gestion des producteurs dans ses démarches de conception de l'innovation.

La zone Ouest du Burkina Faso initialement sous peuplée, est caractérisée ces trente dernières années par une dynamique démographique liée aux naissances mais surtout aux migrants du Nord et du centre du pays chassés par deux importantes sécheresses (1972-1973 et 1983-1984) (Youl et al., 2007). Cette croissance démographique entraîne une forte pression sur les ressources naturelles. A l'augmentation de la surface cultivée impliquant le défrichement des parcours s'ajoute un accroissement des effectifs de cheptel bovin à la suite de la sédentarisation des pasteurs et du développement de l'élevage chez les agriculteurs (Lhoste, 1988 ; INERA/CIRDES, 1997). Il en résulte une double pression agricole et pastorale sur les terres et les ressources végétales. Cette situation engendre fréquemment

des antagonismes entre les éleveurs en quête d'espace pour leurs troupeaux et les agriculteurs en quête de terres cultivables. En parallèle, la baisse de la pluviosité et la variabilité climatique rendent très aléatoire la productivité végétale et animale.

Toutes ces contraintes couplées à l'instabilité de l'environnement économique (hausse du prix des intrants, baisse du prix du coton) nécessitent que les modes de gestion des exploitations soient repensés. C'est dans ce contexte qu'un outil de simulation simple a été mis en place par le projet CORUS simulant la production animale et végétale de l'exploitation en tenant compte des règles de décision du producteur afin d'aider à la conception d'innovations techniques et organisationnelles (Andrieu et al., 2009).

L'objectif de la présente étude est d'analyser à partir du simulateur la situation technico-économique de quelques exploitations pratiquant l'embouche bovine et d'appréhender la perception des exploitants sur cet outil appelé dans leur langage « calculatrice ».

La présente communication propose en premier lieu de décrire la méthodologie adoptée et le simulateur utilisé. Elle présente ensuite les écarts entre les données réelles mesurées et les données virtuelles simulées de quelques exploitations d'embouche ainsi que l'appréciation de l'outil par les emboucheurs. Les profils des producteurs susceptibles d'être intéressés par le modèle et son intérêt comme outil d'évaluation d'impact d'innovations dans des contextes similaires sont ensuite discutés.

2. Matériel et Méthode

2.1. Zone d'étude

Cette étude a été menée dans deux villages, Koumbia et Kourouma de la zone soudanienne à l'Ouest du Burkina Faso.

Koumbia (Latitude 12°42'20" Nord ; longitude 4°24'01" Est ; altitude 290 m) est une commune rurale de la province de Tuy située à 67 km à l'Est de Bobo-Dioulasso. L'emprise agricole est comprise entre 20 - 30% de la surface du territoire villageois. Les systèmes de production sont principalement composés de céréaliculture, de cotonculture et d'élevage bovin (Diallo, 2006). La typologie des unités de production de Koumbia et Waly réalisée par Blanchard (2005), a mis en évidence trois principaux types de systèmes de production : les éleveurs (9%), les agriculteurs (84%) et les agro-éleveurs (7%).

Le village de Kourouma (Longitude 30°45'59" Ouest ; latitude 12°87'29" Nord et 337 m d'altitude) se situe dans la province du KénéDougou, à 83 km au Nord-Ouest de Bobo-Dioulasso. L'emprise agricole est estimée à 40% (Daho, 2006) du domaine villageois. Dans ce village, Daho (2006), a identifié trois grands groupes d'unités de production à l'image de ceux identifiés à Koumbia à savoir les agriculteurs (73%), les agro-éleveurs (17%) et les éleveurs (10%).

2.2. Le modèle

Le modèle utilisé dans cette étude simule le fonctionnement technico-économique d'une exploitation à l'échelle d'une année et permet d'analyser l'impact d'une transformation de l'exploitation liée par exemple à l'introduction d'un atelier d'embouche, la modification de l'assolement, l'amélioration de la production de fumure organique (Andrieu et al., 2009). L'année simulée est divisée en trois saisons : la saison pluvieuse, la saison sèche chaude, la saison sèche froide. Pour chaque saison, le modèle calcule en fonction des données entrées par l'utilisateur - caractéristiques structurelles de l'exploitation, décisions stratégiques et tactiques, type d'année - trois principaux bilans : le bilan alimentaire, le bilan minéral, le bilan fourrager ainsi que le solde économique des activités agro-pastorales. Les décisions renseignées par l'utilisateur concernent le choix d'assolement, les achats et ventes d'animaux, la part des résidus de culture disponibles récoltés, la valorisation de la matière organique et les apports de fertilisants chimiques.

Le modèle ou « calculatrice » a été développée sous Excel. Ce langage est plus facile à maîtriser que d'autres langages plus complexes et permet par conséquent d'aboutir à un prototype fonctionnel en très peu de temps. Cette calculatrice comporte sept modules reflétant les interactions entre systèmes de culture et d'élevage au sein des exploitations. Il

s'agit des modules : ressources de l'exploitation, système d'élevage, système de culture, ration, production de fumure organique, fertilisation et économie de l'exploitation.

2.3. Recueil et analyse des données

L'analyse s'est appuyée sur le suivi de sept exploitations effectués durant la saison sèche de la campagne 2008-2009 et des entretiens avec les chefs d'exploitations à la fin de cette même saison. Ces chefs exploitants se sont portés volontaires pour expérimenter des techniques améliorées d'alimentation des bœufs d'embouche nécessitant une augmentation en quantité et en qualité des stocks fourragers : introduction d'une sole de culture fourragère de *Mucuna pruriens*, construction d'un fenil, enrichissement de la paille avec de l'urée.

Les suivis ont consisté à noter par période de quinze jours, toutes les activités agricoles (récolte de résidus de culture, apport de fumure organique...) et pastorales (achat d'animaux, d'aliments bétail, vente d'animaux, localisation des animaux...) menées dans l'exploitation. Ces données ont été comparées aux différentes sorties de la calculatrice dans le but de cerner le réalisme des données virtuelles et d'évaluer l'intérêt du modèle comme outil d'évaluation d'impact de l'innovation. Le solde économique réel des exploitations a été calculé en faisant la différence entre les produits réels (ventes d'animaux pendant la saison sèche chaude) et les charges réelles (achats d'animaux, d'aliments, frais vétérinaires) enregistrées dans les cahiers de suivi.

Des simulations ont été réalisées en présence des producteurs pour obtenir les données virtuelles. Les caractéristiques structurelles de l'exploitation et les pratiques réalisées durant la campagne agricole 2008-2009 étaient alors rentrées dans la calculatrice en précisant notamment les activités d'embouche réalisées (nombre d'animaux achetés et vendus, quantités de tourteau achetées...). Des entretiens individuels visant à analyser les sorties du modèle d'une part et leur intérêt d'utiliser le modèle dans la prévision des différentes activités agricoles et pastorales d'autre part ont été effectués avec les chefs d'exploitants.

La validation du modèle consiste à comparer les variables de sortie du modèle et les résultats d'observation de terrain (Bouazzama et al., 2007 ; Bamba, 2008). Pour appréhender les différences entre données virtuelles et réelles au sein de chaque exploitation, un calcul des écarts a été fait de la façon suivante :

Ecart = (valeur virtuelle- valeur réelle) x 100 / valeur réelle, puis un certain nombre de critères statistiques ont été calculés.

Parmi les critères statistiques généralement utilisés pour la validation on a le biais, la MSE, la RMSE, l'efficacité.

Le biais est la moyenne des différences entre les valeurs observées et les valeurs calculées par le modèle. Il permet de savoir si le modèle a plutôt tendance à surévaluer les données (son signe est négatif) ou a sous évalué les données (son signe est positif). On pourrait aussi dire que si le biais est proche de zéro alors le modèle a tendance à bien évaluer les données observées.

$$\text{Le biais} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)$$

Avec Y_i la valeur observée et Y'_i la valeur calculée par le modèle et N le nombre d'observations

Il faut signaler que le biais est un indicateur d'évaluations à prendre avec une certaine réserve car sa faible valeur peut provenir soit de valeurs de Y faible, soit il peut y avoir un phénomène de compensation entre les valeurs surévaluées et les valeurs sous-évaluées.

La MSE (MEAN SQUARE ERROR) est la moyenne des écarts quadratiques entre les valeurs observées et les valeurs calculées par le modèle. Le fait de passer au carré permet d'éliminer le phénomène de compensation. Une valeur proche de zéro indiquerait que les valeurs calculées par le modèle sont proches des valeurs observées.

$$\text{La MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)^2$$

La **RMSE** (*ROOT MEAN SQUARE ERROR*) s'interprète de la même façon que la MSE, elle a l'avantage d'être de la même unité que Y.

$$\text{la RMSE} = \sqrt{\text{MSE}}$$

L'**efficience** (EF) permet de mesurer la qualité de prédiction du modèle par rapport à la moyenne des observations.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}$$

\bar{Y} Représente la moyenne des observations

Si le modèle est parfait alors, pour tout i on aura $Y_i = \hat{Y}_i$ et EF=1. Si le modèle utilise la moyenne des observations on aura $\hat{Y}_i = \bar{Y}$ pour tout i et EF=0. Un modèle avec une efficience proche de zéro ne sera pas considéré comme un bon modèle car il ne fait pas mieux que la moyenne. L'efficience est toujours inférieure à 1 mais ne possède pas de borne inférieure car un modèle peut être encore plus mauvais en terme de qualité de prédiction que la moyenne.

3. Résultats

3.1. Embouche et bilan économique virtuel

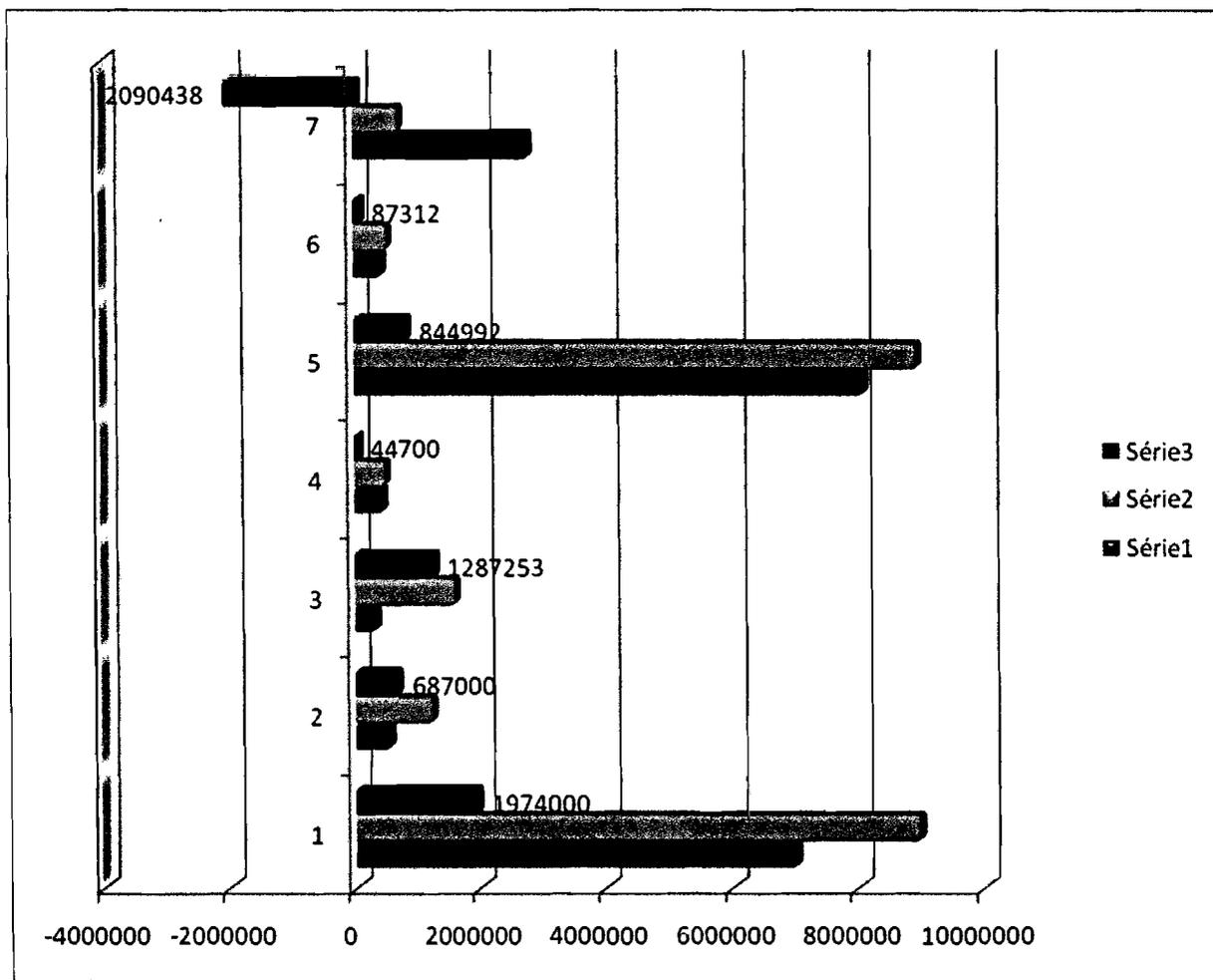
Le tableau I illustre quelques entrées concernant le module système d'élevage des sept exploitations. Pour toutes les exploitations, seuls les bovins d'embouche et de trait reçoivent une complémentation de leur ration en saison sèche chaude conformément aux informations fournies par les producteurs. D'autres caractéristiques structurelles ont été entrées au niveau du simulateur mais ne sont pas représentées dans ce tableau. Il s'agit du nombre de bovins de trait, de vaches laitières, de la proportion de résidus de culture récoltée, des frais vétérinaire annuel.... Il faut noter que 2 exploitants sur 7 ont effectué des achats et ventes de petits ruminants en plus de leurs ventes de bovins d'embouche. Aussi, on a enregistré des ventes de bovins d'élevage chez 3 exploitants pratiquant l'embouche bovine. L'ensemble de ces informations a été utilisé pour réaliser les simulations.

Tableau XV : Entrées du module système d'élevage des sept exploitations

Villages	Koumbia				Kourouma		
	1	2	3	4	5	6	7
Exploitations	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de bovins d'élevage au début de l'hivernage	100	24	80	0	88	29	15
Nombre de bovins d'embouche au début de l'hivernage	35	2	1	0	0	0	0
Nombre de petits ruminants au début de l'hivernage	80	17	20	21	15	0	5
Nombre de petits ruminants achetés	0	0	0	3	0	0	9
Nombre de bovins d'embouche achetés	40	3	2	2	32	2	10
Nombre de petits ruminants vendus	0	0	0	8	0	0	13
Nombre de bovins d'élevage vendus	0	3	9	0	2	0	0
Nombre de bovins d'embouche vendus	50	5	3	1	32	2	2

La figure 1 montre les charges opérationnelles (série 1) et produits bruts (série 2) virtuels dus aux activités d'élevage. Le bilan économique virtuel représenté par la série 3 est la différence entre les recettes tirées de l'embouche y compris les ventes de bœufs d'élevage, de petits ruminants et les charges engendrées par l'embouche/élevage.

On note ainsi un bilan positif allant de 44 700 FCFA à plus de 1 900 000 FCFA au niveau des six premières exploitations. Le bilan est négatif (- 2 090 438 FCFA) au niveau de la septième exploitation.



Série 1 : Charges opérationnelles liées à l'élevage Série 2 : produit brut lié à l'élevage
 Série 3 : Bilan économique

Figure 11: Comparaison du bilan économique (CFA) virtuel de sept exploitations

Il est à noter que le bilan économique virtuel est fonction du bilan fourrager virtuel de l'exploitation (tableau 2). En effet le pourcentage virtuel de résidus de culture récolté dont la quantité varie en fonction de la superficie totale de l'exploitation et des pratiques de ramassage des résidus mentionnés par le producteur joue sur le bilan fourrager et par conséquent sur le nombre virtuel de sacs de tourteau que le modèle va acheter en cas de bilan déficitaire. Cet achat va alors influencer sur les charges économiques virtuelles liées à l'activité d'embouche. C'est ainsi qu'au niveau de l'exploitation 5, malgré un nombre assez élevé de bovins d'embouche vendu (32 bovins d'embouche) elle n'a obtenu que 26 406 FCFA /animal comme gain alors que l'exploitation 2 avec seulement 5 bovins d'embouche vendus se retrouve avec un bilan économique de 137 400 FCFA/animal. Cette dernière a en effet moins de charges liées à l'alimentation des animaux car plus de la moitié de ses résidus de cultures a été récoltée et a permis de couvrir les besoins des animaux alors que l'exploitation 5 n'a pas stocké ses résidus de culture ce qui s'est traduit par l'achat virtuel d'une grande quantité de tourteau de coton. De même, l'exploitation 1, malgré la vente de 50 bovins d'embouche, se retrouve avec un bilan de 39 480 FCFA par animal lié au fait que 25 animaux n'ont pas été vendus et ont engendré des achats virtuels de tourteau. Aussi, au niveau de la quatrième exploitation on a enregistré un bilan économique de 44 700 FCFA par animal lié au fait qu'un des deux bovins d'embouche n'a pas été vendu et a engendré des dépenses en consommant l'ensemble des stocks fourragers virtuels. Au niveau de l'exploitation sept, malgré la vente de treize petits ruminants, elle n'a pas pu couvrir les dépenses engendrées par la non vente de huit des dix bovins d'embouche achetés.

Tableau II : bilan économique virtuel par animal, fraction de résidus récolté et nombre virtuel de sacs de tourteau à acheter

Producteurs	1	2	3	4	5	6	7
Nb bovins embouché	75	5	3	2	32	2	10
% de résidus récolté	50	67	67	58	0	42	67
superficie total cultures (ha)	42	1,85	4,75	2,5	12,125	28	1
Nb sacs tourteaux à acheter	336,4	20,2 137	6 107	11,9	267,4	0	83,3
Gain/animal	39 480	400	271	44 700	26 406	43 656	0

Nb : nombre

3.2. Comparaison des sorties simulées avec celles évaluées avec les producteurs

Le tableau 3 présente les charges réelles et produits réels engendrés par l'élevage au niveau des exploitations ainsi que les charges virtuelles et produits virtuels obtenus par simulation. On a aussi une comparaison des données à partir du calcul des indices statistiques. Les valeurs du biais obtenus sont négatives et différentes de la valeur optimale pour les paramètres charges virtuelles/réelles et produits virtuels/réels. Aussi la RMSE est largement différente de la valeur optimale pour les mêmes paramètres. Ce qui veut dire que le modèle a tendance à surévaluer les données. Par contre les efficacités (EF) obtenues sont très proches de la valeur optimale. Elles sont de 0,84 et 0,98 respectivement pour les charges virtuelles/réelles et produits virtuels/réels. Ce qui témoigne de la qualité de prédiction de la calculatrice par rapport à la moyenne des observations ou données réelles. Le calcul des écarts entre les données virtuelles et réelles au sein de chaque exploitation a permis de mieux comprendre la surestimation des données par le modèle. On note ainsi que la calculatrice surestime les charges virtuelles pour 5 des 7 exploitations. En effet, un écart important (supérieur à 100%) entre charges réelles et virtuelles a été noté au niveau des exploitations 3 et 7. Dans le premier cas le modèle n'a pas pu rendre compte de la réforme des bœufs de trait en bœufs d'embouche et a surestimer le coût d'acquisition de ces animaux et dans le deuxième cas la mévente de 8 bovins d'embouche a entraîné des charges virtuelles importantes. L'écart est compris entre 30 et 45 % pour les exploitations 5 et 6 et entre 15 et 20 % pour les exploitations 1 et 2. Cet écart est certainement dû au coup d'acquisition des bovins d'embouches qui diffère d'un animal à l'autre et d'une période à l'autre alors que celui de la calculatrice est fixe. Au niveau de l'exploitation 4 on note pratiquement une équivalence entre les charges réelles et virtuelles. Au niveau du produit brut lié à l'élevage on a aussi des écarts importants entre produits réels et virtuels. Les produits bruts virtuels obtenus sont généralement (5 exploitations concernées) supérieurs aux produits bruts réels. L'écart est compris entre 20 et 30 % pour les exploitations 3 et 5. Dans le cas de l'exploitation 3 le prix de vente moyen (115 000 F/Bovin d'élevage) utilisé dans le modèle pour calculer le produit brut des bovins d'élevage ne permettait pas de rendre compte des prix de ventes réels des bovins d'élevage allant de 55 000 à 175 000 F. Chez l'exploitant 5, l'écart est certainement dû aux prix de vente réels des bovins d'embouche qui sont souvent inférieurs à celui estimé par la calculatrice. L'écart est inférieur à 10 % pour les exploitations 7, 4, 6, 2 et 1.

Tableau XVI : comparaison des sorties du modèle aux données réelles des sept exploitations

Exploitations	1	2	3	4	5	6	7
Charges Virtuelles	7 026 000	558 000	336 000	455 300	8 110 000	445 500	2 818 250
Charges réelles	8 482 500	660 000	142 550	432 800	5 727 350	335 500	956 000
écart (%)	-17,17	-15,45	135,7	5,19	41,6	32,78	194,76
Le BIAIS	-430336						
La RMSE	1272052						
EF	0,84						
Produits virtuels	9 000 000	1 245 000	1 623 253	500 000	8 954 992	532 812	727 812
Produits réels	9 995 000	1 135 000	2 245 000	490 000	7 427 000	500 000	720 000
écart (%)	-9,95	9,69	-27,69	2,04	20,57	6,56	1,08
Le BIAIS	-10267						
La RMSE	729451						
EF	0,98						

3.3. Perception sur l'outil des exploitations pratiquant l'emboche bovine

La figure 2 ci-dessous illustre les réactions des producteurs après analyse des sorties de la calculatrice dans leur ensemble. Ces réactions se sont centrées autour des charges opérationnelles et les produits bruts virtuels calculés par le modèle. Les réactions diffèrent d'un exploitant à l'autre et semblent être fonction de l'expérience qu'ont les producteurs dans la pratique de l'emboche mais aussi de leur curiosité. Ainsi, les producteurs 1 et 3 disposent de plusieurs années d'expérience dans l'activité d'emboche (3 à 5 années). Ce sont aussi les producteurs les plus âgés de l'échantillon. Les bilans virtuels simulés pour ces producteurs sont les plus importants de l'échantillon. Ces deux producteurs estiment que ce bilan virtuel concorde avec ce qu'ils espéraient de l'activité d'emboche. Ils ne voient donc pas la nécessité de la calculatrice.

Les autres producteurs sont à la fois plus jeunes et plus novices dans l'activité d'emboche et sont en quête de conseil pour améliorer leur pratique d'emboche. Plusieurs questions sont souvent posées par le chef d'exploitant et autour de cette calculatrice un débat d'ordre technique et économique est généralement mené afin d'analyser les écarts entre données réelles et virtuelles. Ils cherchent donc à savoir les causes de la perte virtuelle en gain économique que la calculatrice fait ressortir due surtout à la mévente des bovins d'emboche, à combien vont s'élever les charges opérationnelles liée à l'élevage pour un tel nombre de bovin d'emboche... Pour cette catégorie de producteurs, le bien fondé de la calculatrice réside dans le fait qu'elle permet d'évaluer dans un futur proche les impacts techniques et économiques de telles ou telles choix d'activités agricoles et/ou pastorales sur les performances de leur exploitation ou de mesurer l'impact (positif ou négatif) d'une bonne ou d'une mauvaise conduite de l'emboche sur le bilan économique de l'exploitation (exploitation 7).

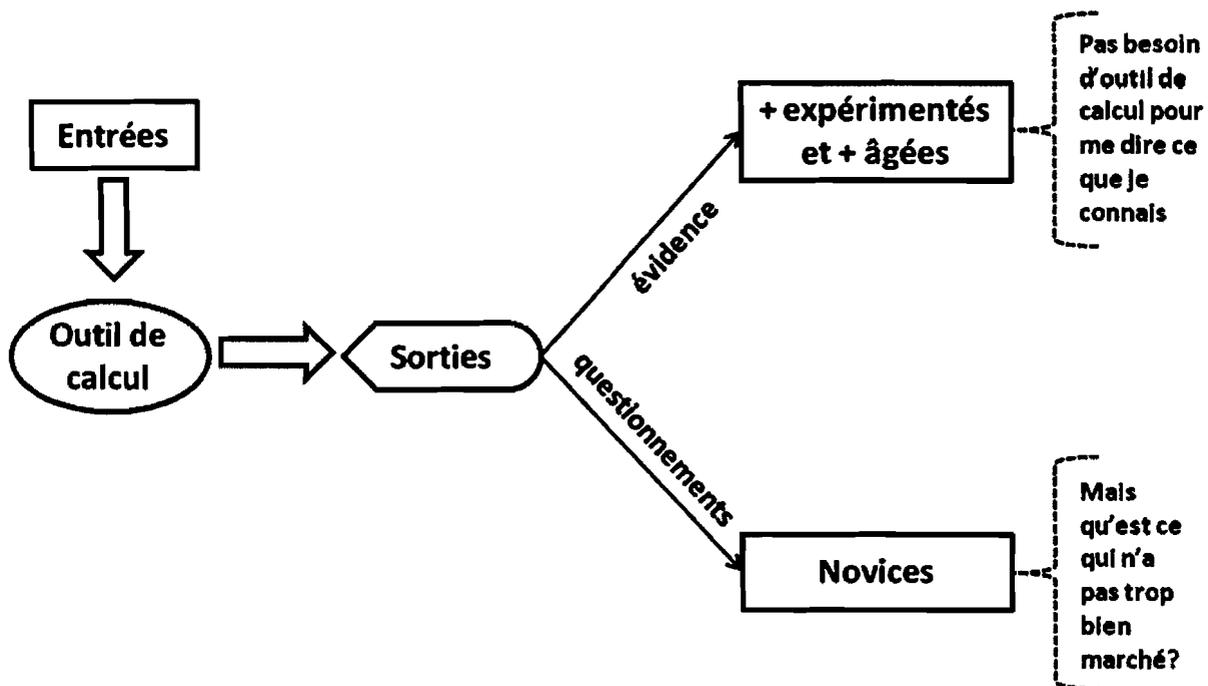


Figure 2: Schéma des perceptions des exploitants sur l'outil de calcul

4. Discussion

La simulation avec les chefs d'exploitations des activités agro-pastorales et plus particulièrement de l'embouche a permis d'analyser les principaux déterminants du bilan économique. La figure 1 présente des bilans économiques virtuels positifs au niveau des 6 exploitations. Mais une analyse plus détaillée montre que cette activité lorsqu'elle n'est pas bien menée peut entraîner une faible rentabilité de l'exploitation. Cette faible rentabilité est liée à la production de stocks fourragers insuffisants pour couvrir les besoins des animaux ou à la mévente d'animaux qui engendrent des coûts pour leur alimentation. Au regard de ces résultats, l'importance de la calculatrice est mise en exergue dans la détermination et l'orientation des modes de gestion des activités pastorales afin de minimiser les charges notamment celles liées à l'alimentation des animaux. Selon Prost (2008), les modèles sont des outils rapides et puissants d'exploration et d'évaluation, capables d'intégrer un grand nombre de phénomènes et d'interactions afin de décrire une partie de la réalité.

Les simulations ont illustré des modes de calcul du solde économique différents entre le producteur et le modèle. Le producteur ne compte pas comme une charge les animaux qui ne sont pas vendus durant la saison sèche chaude et qui restent en sa propriété. Pour le modèle, un animal non vendu entraîne un coût additionnel notamment pour l'engraissement qui est pris en compte dans le calcul du solde économique. Les charges virtuelles sont d'ailleurs souvent supérieures aux charges réelles. Les analyses statistiques ont permis de valider le modèle dans son ensemble et c'est ainsi qu'après le calcul du biais et de la RMSEL il s'est avéré que le modèle a plutôt tendance à surévaluer les données. Cette surévaluation est due souvent aux ventes des animaux dont le prix varie en fonction de l'animal embouché et de la période alors qu'il est fixe au niveau du modèle. Le calcul des efficacités (EF) a par contre témoigné de la qualité de prédiction du modèle par rapport aux données réelles. En somme, les écarts entre données réelles et virtuelles n'invalident donc pas la calculatrice mais illustrent l'intérêt d'améliorer l'enregistrement des pratiques des producteurs et le calibrage du modèle. Woodward et Rollo (2002), ont affirmé qu'il est souvent difficile de valider les modèles car les données avec lesquelles sont validés les modèles peuvent comporter des erreurs de mesure ou d'interprétation rendant ainsi difficile la validation.

L'outil de calcul étant à ses débuts, il est difficile de mener une évaluation objectivement très affinée de l'impact de celui-ci dans la gestion à long terme des activités agricoles et

pastorales en milieu rural. Néanmoins une appréciation de l'intérêt de la calculatrice a été matérialisée au niveau de la figure 2. Ainsi, au regard de la figure 2, l'outil n'intéresse qu'une certaine catégorie de producteurs. En effet, lorsque les sorties de la calculatrice n'apportent pas d'information additionnelle au producteur, on note un désintérêt de l'exploitant dans l'utilisation de la calculatrice comme outil de planification. Cela est peut être lié à une grande maîtrise technique de cette activité par cette catégorie de producteurs. D'après Ntsama Etoundi (2007), l'adoption d'une nouvelle technique est fonction de ses avantages et inconvénients et de l'état de l'environnement selon ses critères de choix. En fait, une innovation ne sera adoptée que lorsque les individus concernés seront convaincus, compte tenu des informations dont ils disposent, de l'intérêt ou des gains qu'ils peuvent en tirer.

Au regard des résultats obtenus nous pouvons dire que la calculatrice peut constituer un outil intéressant pour l'évaluation ex-ante des activités agricoles ou pastorales telles que l'introduction d'un atelier d'embouche dans le cas de producteurs en cours d'apprentissage. En effet, elle permet aux producteurs de réduire les incertitudes dans la pratique des activités en fournissant des résultats d'options de gestion alternatives. Elle peut donc permettre à des agriculteurs de se lancer dans la pratique de l'embouche bovine en associant les cultures fourragères ou permettre aux éleveurs de prévoir dans leur assolement l'introduction d'une culture fourragère... En plus de cette fonction de prospection, la calculatrice développée sous Excel est facile d'utilisation. D'autres modèles ont été développés dans les zones cotonnière Ouest Africaine mais sont souvent complexes ou ne prennent pas en compte toutes les caractéristiques de l'exploitation. En effet, Youl et al, (2007) à l'issu d'enquêtes fermées menées auprès d'une centaine de producteurs du Sud-ouest du Burkina ont mis au point un modèle mathématique entre les besoins des exploitations agricoles et l'utilisation de la ressource organique par les producteurs. Ce modèle permet donc de quantifier les besoins en terre à cultiver, en céréales alimentaires, en argent et en bois de chauffe mais ne prend pas en compte la production agricole et pastorale. Le modèle « COTONS » est un autre outil complexe conçu par Jallas et al., (1999) qui simule la croissance et le développement quotidien d'une culture de cotonnier. Il permet la simulation d'une seule culture et ne prend pas en compte les autres cultures ni les caractéristiques des exploitations. Aussi ce modèle à besoin pour fonctionner correctement d'être renseigné quotidiennement sur certains paramètres comme la température du milieu, l'humidité relative...données difficile à acquérir dans le cadre d'une activité d'aide à la décision avec le producteur.

En somme, la calculatrice au regard des autres modèles plus complexes semble être une piste à explorer pour l'évaluation d'impact d'innovations agro-pastorales et l'aide à la prise de décision dans les exploitations de l'Ouest du Burkina Faso.

5. Conclusion

Cette analyse a permis d'analyser la validité d'une méthode ex-ante d'évaluation d'innovations telles que l'embouche. Elle a ainsi permis de cerner le réalisme des sorties de la calculatrice par la comparaison des données virtuelles aux données réelles. Il ressort donc que les écarts entre données réelles et données virtuelles illustrent la variabilité des prix de vente des animaux embouchés et aussi des lacunes dans l'enregistrement des pratiques de ces exploitations. Cette étude a également permis d'identifier l'intérêt de la calculatrice pour les producteurs. En effet, l'intérêt de la calculatrice n'est perçu par les exploitants que lorsqu'elle donne des renseignements sur des aspects nouveaux, méconnus des exploitants. Au regard des résultats obtenus, les questions suivantes devront être analysées : N'y a-t-il pas lieu d'apporter quelques modifications au modèle afin d'être plus proche de la vision des producteurs (actualisation des prix des animaux embouché en fonction de la période, séparer les charges opérationnelles propres des animaux embouchés...) ? Les exploitants des deux villages présentant d'importantes lacunes dans la gestion comptable de leur exploitation pourront-ils vraiment utiliser la calculatrice dans la gestion de leurs activités agricoles et pastorales ?

Références bibliographiques

- ADAMS A., 1982. Barriers to product innovation in small firms: Policy Implications. *European Small Business Journal* 1, 67–86.
- ANDRIEU N., DUGUE P., LE GAL P.Y., SCHALLER N., 2009. Modéliser le fonctionnement d'exploitations agricoles de polyculture élevage pour une démarche de conseil. Cas de la zone cotonnière de l'ouest du Burkina Faso. In : Colloque/ Savanes africaines en développement : innover pour durer. Garoua - Cameroun, 20-24 avril 2009, 12p.
- ANDRIEU, N., 2004. Diversité du territoire de l'exploitation d'élevage et sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques: étude empirique et modélisation. Paris, thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon: 258p.
- BAMBA C., 2008. Programmation d'algorithmes d'estimation et d'évaluation de modèle non-linéaire implantés sous la plate forme Record. INP-Toulouse/ENSAT/INRA, 81p.
- BLANCHARD M., 2005. Relations agriculture élevage en zone cotonnière : territoire de Koumbia et waly, Burkina Faso. Créteiln Mémoire DESS, Université Paris XII, Val de Marne, 63p + annexes
- BOUAZZAMA B., XANTHOULIS D., BOUAZIZ A., 2007. Validation du modèle SIRMOD pour améliorer les performances de l'irrigation de la luzerne par la Robta au niveau du périmètre du Tadla. HTE (136) C, 8-16.
- DAHO B., 2006. Dynamique des systèmes agropastoraux dans l'Ouest du Burkina Faso : cas des relations agriculture-élevage dans le terroir de Kourouma. Mémoire de fin d'études IDR/UPB, 77p + annexes.
- DIALLO M., 2006. Savoirs locaux et pratiques de conduite des troupeaux au pâturage : Elaboration d'une méthode d'étude. Mémoire de DEA IDR/UPB, 70p + annexes.
- INERA/CIRDES, 1997. Etude des systèmes d'élevage de la zone de Sidéradougou. Rapport de recherche. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, Inera/Cirdes, 60 p.
- JALLAS E., CRETENET M., SEQUEIRA R., TURNER S., GERARDEAUX E., MARTIN P., JEAN J., CLOUVEL P., 1999. COTONS, une nouvelle génération de modèles de simulation des cultures. *Agriculture et développement* 22 : 35-46.
- LHOSTE P., 1988. Etude de l'élevage dans le développement des zones cotonnières. Maison-Alfort, France, Cirad-lemvt.
- NTSAMA ETOUNDI S.M., 2007. Analyse de l'impact de l'innovation sur la productivité agricole: cas du maïs dans la province du centre Cameroun. Mémoire de DEA à l'Université de Yaoundé II -Soa, 122p + annexes
- PROST L., 2008. Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec des futures utilisateurs: Le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR. Thèse de doctorat de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), 348p.
- YOUL S., BARBIER B., MOULIN C.H., MANLAY R.J., BOTONI E., MASSE D., HIEN V., FELLER C., 2007. Modélisation empirique des principaux déterminants socioéconomiques de la gestion des exploitations agricoles au Sud-ouest du Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 12(1), 9-21.

Annexe 2 : Fiche de suivi des activités agricoles et pastorales

activités culturales

	parcelles coton				parcelles maïs				parcelles sorgho				parcelles cultures secondaires			
	coton1	coton2	coton3	coton4	maïs1	maïs2	maïs3	maïs4	sorgho1	sorgho2	sorgho3	sorgho4	niebé	arachide	mucuna	autre
localisation																
type de sol																
superficie																
date FO																
quantité FO																
date labour																
date herbicide																
date semis																
date résèmis																
date démariage																
date NPK																
quantité NPK																
date sarclage																
date Urée																
Quantité Urée																
date buttage																
date traitement1																
date traitement2																
date traitement3																
date traitement4																
date traitement5																
date traitement6																
date récoltes																

Renseignements économiques**herbicide selectif**

culture	coton1	coton2	coton3	coton4	maïs1	maïs2	maïs3	maïs4	sorgho1	sorgho2	sorgho3	sorgho4	niebé	arachide	mucuna	autre
type (nom)																
quantité																
prix																
herbicide total																
type (nom)																
quantité																
prix																

insecticides**traitement1**

type																
quantité																
prix																

Traitement2

type																
quantité																
prix																

Traitement3

type																
quantité																
prix																

Traitement4

type																
quantité																
prix																

Traitement5

type																
quantité																
prix																

engrais minéraux

	type1	prix sac	type2	prix sac	type3	prix sac
NPK						
Urée						
autres						

