

Modélisation conceptuelle de la gestion adaptative de la biomasse face à l'aléa climatique en systèmes agro-sylvopastoraux

Myriam Grillot^{1,2,3,*}, Jonathan Vayssières^{1,2,3,*}, François Guerrin^{2,4} et Philippe Lecomte^{1,2,3}

¹ Cirad, UMR SELMET, Dakar, Sénégal

² SELMET, université de Montpellier, Montpellier, France

³ PPZS, Pôle pastoralisme & zones sèches, centre ISRA Hann, BP 2057, Dakar, Sénégal

⁴ Inra, UMR SELMET, 34398 Montpellier, France

Résumé – Le recyclage de la biomasse végétale et animale joue un rôle central dans le fonctionnement des systèmes agro-sylvopastoraux. En Afrique de l'Ouest, la variabilité des précipitations impacte les pratiques de gestion de cette biomasse pour nourrir les hommes, le bétail, le sol et les plantes. Cette étude décrit un modèle d'action conceptuel basé sur des règles « si-alors-sinon » qui représentent les décisions de gestion de la biomasse des ménages agricoles. L'étude souligne les conséquences en cascade d'un aléa pluviométrique sur le calendrier des activités agricoles, les quantités et la nature des biomasses mobilisées. Les activités les plus directement impactées sont le semis et la récolte des cultures, l'alimentation animale et, indirectement, la fertilisation des sols et la gestion des stocks alimentaires. Le modèle d'action regroupe les principales règles et modalités de gestion constituant les pratiques des ménages agricoles. Il est défini pour quatre types de ménages agriculture-élevage selon leurs activités dominantes : agriculture *versus* élevage et vivrier *versus* vente. Les ménages vivriers et élevage sont plus sensibles aux variations pluviométriques. Ils présentent une gestion plus adaptative car ils sont davantage dépendants de leur propre production. Ce modèle d'action a été conçu en vue de son intégration dans un modèle à base d'agents pour simuler les conséquences de l'aléa pluviométrique sur les flux de biomasses résultant des interactions entre les ménages agricoles d'une communauté villageoise en Afrique de l'Ouest.

Mots clés : pratique agricole / aléa climatique / gestion de la biomasse / modèle d'action / Sénégal

Abstract – **Conceptual modelling of adaptive biomass management facing climate risk in agro-silvopastoral systems.** Biomass recycling plays a key role in the functioning of agro-silvopastoral systems. In West Africa, the variability of rainfall impacts the management of this biomass to feed men, livestock, soil and plants. This study describes a conceptual model of action, based on “if-then-else” rules, which represent the management decisions of the biomass by the farm households. The study underlines the cascading consequences of rainfall hazard on the farming activity schedule, the quantities and the nature of the mobilized biomasses. The most directly impacted activities are planting and harvesting of crops, animal feeding and, indirectly, soil fertilization and the management of food stocks. The action model encompasses the management rules and conditions constituting the practices of the farm households. It is defined for four types of mixed crop-livestock households defined according to their dominant activities: crop *versus* livestock, and food *versus* income. Food and livestock households are more sensitive to rainfall variations. They present a type of management that is more adaptive because they are more dependent on their own produced biomasses. This action model was designed for its integration into an agent-based model to simulate the consequences of climatic hazards on biomass flows resulting from interactions between diverse households in a typical West African village.

Keywords: agronomic practices / weather hazards / biomass management / action model / Senegal

* Auteurs de correspondance : myriam.grillot@gmail.com;
jonathan.vayssieres@cirad.fr

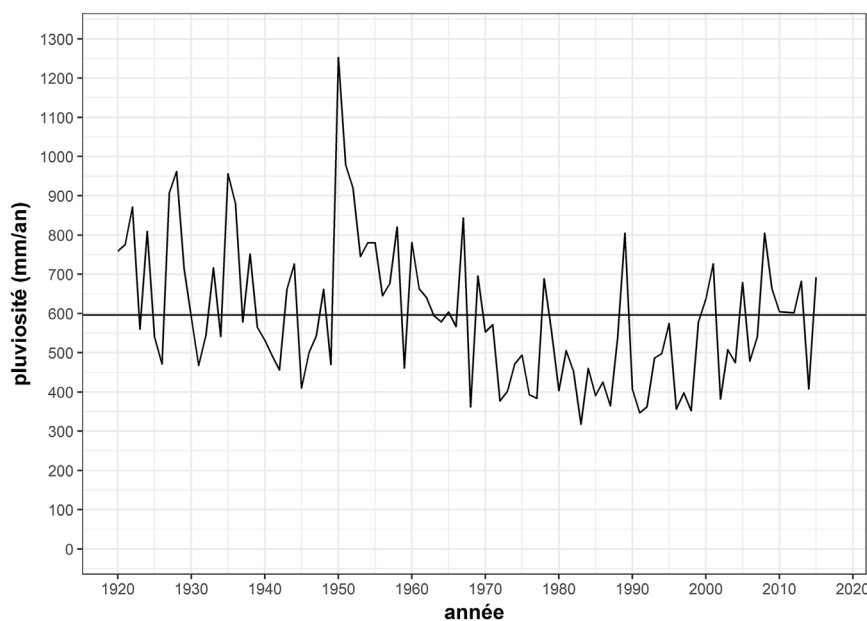


Fig. 1. Évolution de la pluviosité de 1920 à 2016 à Bambeï (15 km au Nord de la zone d'étude, Niakhar). Source : ISRA-CERAAS.
Fig. 1. Change in rainfall from 1920 to 2016 in Bambeï (15 km North of the study area, Niakhar).

1 Introduction

En Afrique de l'Ouest, les systèmes agro-sylvopastoraux (SASP) dominent. Ils sont fortement contraints par des sols pauvres et les quantités d'intrants utilisées sont faibles. Ainsi, les pratiques agricoles se basent sur le recyclage de la biomasse (déjections animales, résidus de récolte) entre les activités de culture et d'élevage (Audouin *et al.*, 2015). L'étude des flux de biomasse a notamment permis de mettre en évidence, dans le fonctionnement des SASP, l'importance des animaux dans les transferts de fertilité au Sénégal (Manlay *et al.*, 2004) et la compétition pour l'utilisation des résidus de culture au Burkina Faso (Andrieu *et al.*, 2015).

Toutefois, ces études n'ont pas pris en compte l'évolution du climat. Bien que celle-ci soit incertaine, l'aléa pluviométrique (variabilité interannuelle) restera important ainsi que le risque de récurrence d'événements extrêmes, tels que les sécheresses de la fin des années 1960 et 1980 (Sultan *et al.*, 2013). Les stratégies d'adaptation des systèmes agricoles ont été discutées : diversification, multiplicité des variétés cultivées, fauche de l'herbe, mobilité des animaux, etc. (Zampaligré *et al.*, 2014 au Burkina Faso).

Trois niveaux décisionnels se différencient (Vayssières *et al.*, 2007) : stratégique à long terme (plusieurs années), tactique à moyen terme (campagne agricole) et opérationnel à court terme (opérations techniques quotidiennes). L'essentiel des études s'intéressant à l'adaptation des systèmes agricoles face à l'évolution climatique se situent au niveau stratégique (Zampaligré *et al.*, 2014). Les travaux au niveau tactique proposent généralement un plan d'action découpé en saisons-pratiques (Audouin *et al.*, 2015 ; Dounias *et al.*, 2002) et ignorent les adaptations quotidiennes. Cependant, ces ajustements impactent les flux de biomasse en pratique et donc le fonctionnement des SASP (Vayssières *et al.*, 2007).

L'objectif de cet article est de mettre en évidence les adaptations quotidiennes de gestion des biomasses d'origine agricole vis-à-vis de leur disponibilité en lien avec l'aléa pluviométrique. Ces adaptations sont représentées dans un modèle d'action (Aubry *et al.*, 1998) qui permet, par des règles simples, de formaliser comment les ménages agricoles décident les actions de gestion aux niveaux tactique et opérationnel. Ce modèle conceptuel a été intégré dans un modèle multi-agents pour simuler les dynamiques spatio-temporelles du fonctionnement d'un SASP, notamment les flux de biomasses y circulant (Grillot *et al.*, 2018).

Ce travail s'intéresse aux décisions prises par des ménages agricoles (ménages dans la suite) et leurs interactions dans des SASP typiques de la zone arachidière du Sénégal, ici des terroirs de 300 à 500 ha. Par « terroir », nous entendons ici : « l'espace dont une communauté agricole, définie par des liens de résidence, tire l'essentiel de sa subsistance » (Bassett *et al.*, 2007).

2 Matériel et méthodes

2.1 Cas d'étude

La zone d'étude est située dans le bassin arachidier au centre du Sénégal dans l'observatoire « Population, santé et environnement » de Niakhar (150 km à l'Est de Dakar). Le climat est sahélo-soudanien avec une pluviosité annuelle très variable de 590 ± 170 mm (Fig. 1). L'année peut être découpée en trois saisons de quatre mois chacune : la saison des pluies, de début juillet à fin octobre, suivie d'une saison sèche froide jusqu'en mars, puis d'une saison sèche chaude jusqu'à la prochaine saison des pluies.

Dans l'observatoire, les SASP sont représentatifs de ceux d'Afrique de l'Ouest. Ils se caractérisent par un bas niveau d'intrants et un recyclage important des biomasses entre

Tableau 1. Caractéristiques structurelles des quatre types de ménage.**Table 1.** Structural characteristics of the four types of household.

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

Un UBT (unité bovin tropical) = un animal de 250 kg de poids vif ; les lettres en exposant représentent les groupes de classes homogènes par variable (test Anova ; $p < 0,1$).

agriculture et élevage. Les activités agricoles se concentrent en saison des pluies. Le mil (céréale sèche vivrière) et l'arachide (légumineuse dite de « rente », c'est-à-dire pour la vente) sont les principales cultures en termes de surfaces et production. Le bétail est la principale source de fertilisation des cultures : directement par les déjections au pâturage ou indirectement *via* l'épandage du fumier produit à l'étable. La quantité de fumier produite augmente depuis les années 1990, avec le développement des activités d'embouche des ruminants (engraissement à l'étable) (Audouin *et al.*, 2015).

2.2 Identification et quantification des flux de biomasse

Dans l'observatoire de Niakhar, trois terroirs ont été sélectionnés pour leur diversité :

- Diohine, de type « traditionnel » avec jachère collective pratiquant l'élevage extensif et l'agriculture de subsistance ;
- Barry, orienté vers l'embouche de ruminants ;
- Sob, tourné vers les cultures de rente (arachide, pastèque).

Des enquêtes ont été menées auprès de l'ensemble des ménages agricoles de ces trois terroirs afin de décrire leurs pratiques agricoles et quantifier les flux de biomasse qui en résultent (Audouin *et al.*, 2015).

2.3 Typologie de ménages agricoles et construction du modèle d'action

Les données d'enquêtes ont été utilisées pour réaliser une typologie des ménages (Balandier, 2017). Les principales variables discriminantes sont (Tab. 1) :

- l'importance des cultures vivrières *versus* de rente ;
- l'importance des systèmes d'élevage extensif *versus* intensif ;
- le rapport entre activités d'élevage et de culture (charge animale par hectare cultivé).

Quatre types de ménages ont été distingués : vivriers orientés cultures (VC) ou élevage (VE), rentiers orientés culture (RC) ou élevage (RE). Les vivriers représentent 80 % des ménages de Diohine, tandis que les rentiers représentent respectivement 67 et 55 % des ménages de Barry et Sob.

Sur les trois terroirs, cinq ménages ont été sélectionnés selon leur proximité à la moyenne des variables discriminantes de leur type : deux de type VC, le plus répandu ; un de type RC ; un de type VE ; un de type RE. La représentativité de l'échantillon a été validée par les notables (chefs de village et de quartier) des trois villages étudiés. Ces ménages ont été suivis mensuellement de mai 2015 à juin 2016 avec l'objectif de décrire :

- la dynamique intra-annuelle des pratiques de gestion de la biomasse ;
- les sources d'ajustements des opérations techniques correspondantes.

La confrontation des opérations prévues le mois précédent et effectivement réalisées le mois suivant a servi de base de discussion avec les ménages pour déterminer les ajustements qu'ils effectuent, à des échelles annuelles ou pluriannuelles, comme suggéré par Aubry *et al.* (1998) et Vayssières *et al.* (2007). Ainsi, des informations sur les ajustements réalisés lors d'années plus sèches ou pluvieuses ont été récoltées et ont servi à construire deux diagrammes stock-flux pour chaque type de ménage : un pour les années sèches et un pour les années pluvieuses. Le modèle d'action et les diagrammes stock-flux ont été validés lors d'ateliers réunissant les personnes interrogées et les notables des trois villages début 2017.

3 Modèle d'action

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

Dans les terroirs étudiés, le calendrier des activités agricoles est ajusté chaque année par les ménages (Fig. 2). La campagne agricole démarre en saison sèche froide avec le

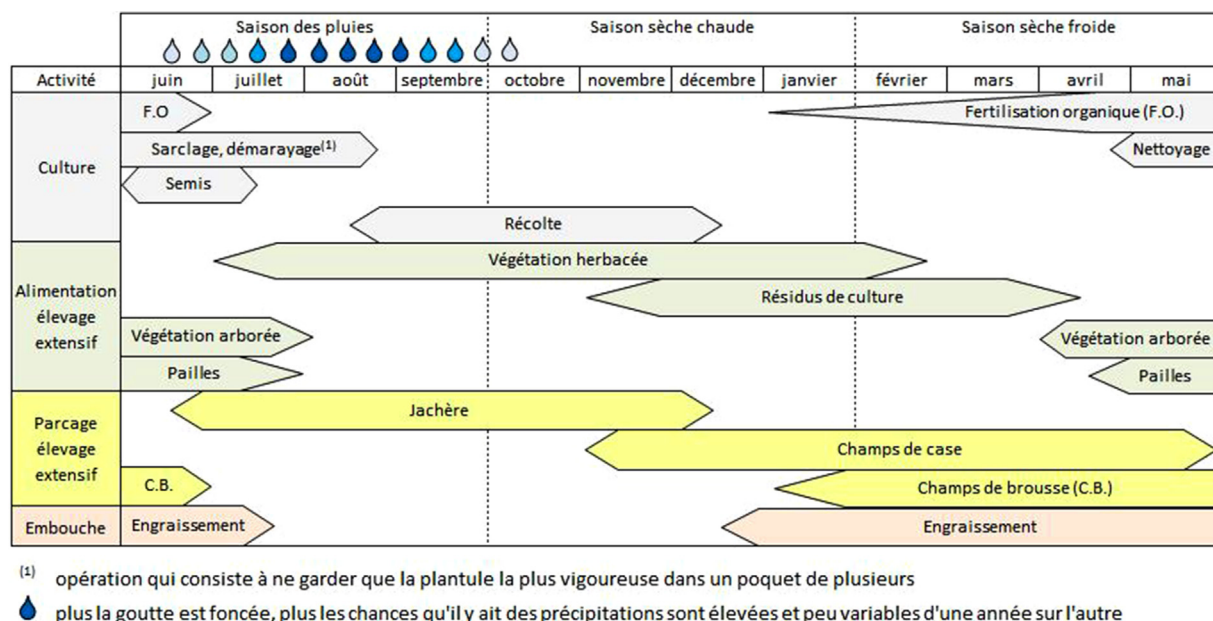


Fig. 2. Calendrier des activités agricoles et ajustement des dates de début et fin des activités (les pointes des flèches indiquent la variabilité des débuts et fins d'activités).

Fig. 2. Calendar of agricultural activities and adjustment of starting and ending dates (arrows show the variability of starting and finalizing of the activities).

nettoyage des champs pour faciliter le passage des semoirs et l'épandage du fumier. Plus le fumier est abondant, plus son épandage intervient tôt. Le début de la saison des pluies est une période de travail intense organisée selon un système de règles donnant la priorité aux cultures vivrières (céréales) et aux champs de case (proches des habitations). Les céréales sont semées avant le début des pluies, l'arachide et les cultures associées (niébé) aux premières pluies. Un re-semis peut être nécessaire en cas de précipitations trop espacées en début de saison des pluies. Les cultures sont mûres à partir de fin septembre selon les variétés. Les niébés précoces sont récoltés au cours de la saison des pluies, à la période de soudure pour l'alimentation humaine. Les dates de récolte sont fortement dépendantes de la pluviométrie de l'année en cours et de la précédente. Plus les stocks d'aliments sont faibles en début de saison des pluies, plus tôt les ménages récoltent les cultures secondaires pour les consommer en frais.

En saison des pluies, les troupeaux conduits en extensif pâturent les jachères et parcours (mares et zones arborées en périphérie du terroir). En début de saison sèche chaude, la finalisation des récoltes déclenche le pâturage des résidus de culture par les troupeaux (vaine pâture). Dès lors, les troupeaux ont accès à l'ensemble du terroir ; ils pâturent la journée et sont parqués dans les champs de case la nuit, y concentrant la matière organique. En saison sèche froide, les ressources fourragères sont limitées et les animaux s'alimentent sur les parcours. Plus la productivité végétale est faible (années sèches), plus tôt les arbres fourragers sont émondés (*Faidherbia albida*) et plus tôt les animaux sont complémentés avec leurs feuillages et les résidus de récolte stockés. Certains éleveurs possèdent de grands troupeaux transhumants, présents dans le terroir uniquement pendant la période de vaine pâture. La durée de leur présence dépend de la disponibilité en

fourrages (plus courte en année sèche). Concernant l'élevage intensif, les cycles d'engraissement des bovins (période entre l'achat et la revente) sont de durées relativement fixes (trois à quatre mois).

3.2 Conséquences des ajustements sur l'intensité des flux de biomasse

La variabilité de la pluviométrie impacte la production végétale naturelle et cultivée. La [figure 3](#) permet de comparer qualitativement l'intensité des flux entre une année pluvieuse et une année sèche pour les deux types de ménages orientés élevage.

Pour le type vivrier-éleveur, la principale source de fourrages pour le bétail est le compartiment « sol-plante » (conduite extensive). L'alimentation des ménages est basée sur l'autoconsommation. En année pluvieuse, la production végétale permet de couvrir les besoins humains et animaux de l'année ([Fig. 3A](#)). Les excédents de grains et de fourrages sont conservés dans les greniers pour l'année suivante ou vendus à d'autres ménages. En année sèche, en général, un déficit pousse les ménages à puiser dans les greniers et/ou à acheter des céréales et des fourrages ([Fig. 3B](#)). La construction des diagrammes stock-flux a mis en évidence des achats et échanges contre services entre ménages vivriers et rentiers, qui manipulent davantage de biomasse.

Pour le type de ménage rentier-éleveur, la principale source de fourrages pour le bétail est le compartiment « grenier » (embouche). La population des ménages, plus nombreuse que chez les vivriers, induit une demande en grains plus importante. Une année pluvieuse ([Fig. 3C](#)) génère davantage d'excédents de cultures, de ventes et donc de revenus qu'une

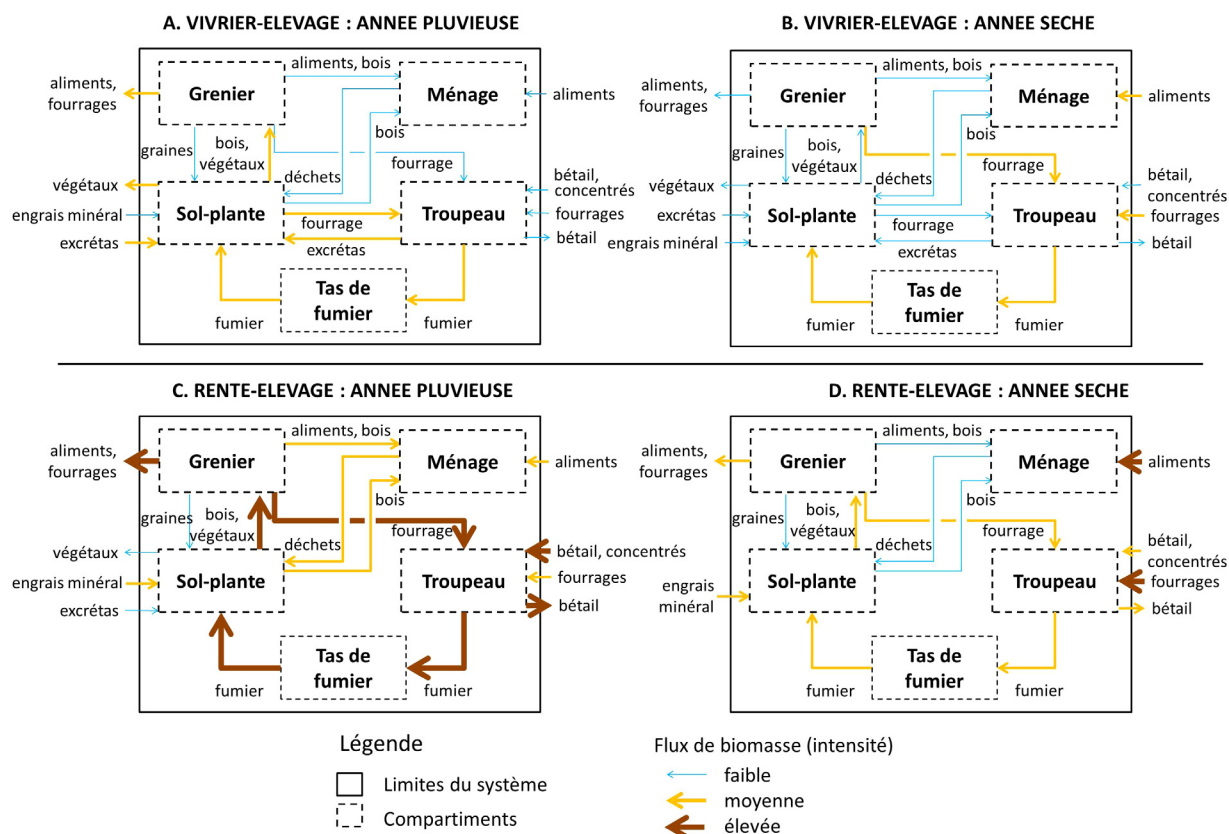


Fig. 3. Diagrammes stock-flux pour une année pluvieuse (gauche) et une année sèche (droite) pour deux types de ménages orientés élevage : vivrier (haut) et rentier (bas).

Fig. 3. Stock-flow models for a rainy year (left) and a dry year (right) for two types of livestock-oriented households: subsistent (top) and market (bottom).

année sèche (Fig. 3D). La disponibilité en fourrages et en trésorerie permet alors d'investir sur davantage d'animaux à emboucher et sans acheter plus de fourrages. La production de fumier, et donc le potentiel de fertilisation des sols pour l'année suivante, sont importants.

En année sèche, les ménages rentiers achètent davantage qu'en année pluvieuse. En outre, l'intensité des flux circulants dans le système rentier (Fig. 3C et D) demeure plus élevée que pour le vivrier (Fig. 3A et B).

De façon similaire à ce que l'on observe pour les ménages orientés élevage, les ménages orientés culture importent plus de céréales (grains) et de fourrages en année sèche qu'en année pluvieuse. Ce changement est toutefois moins marqué car les cultures dépendent moins des biomasses produites au sein du village, que les activités d'élevage.

3.3 Formalisation de la décision

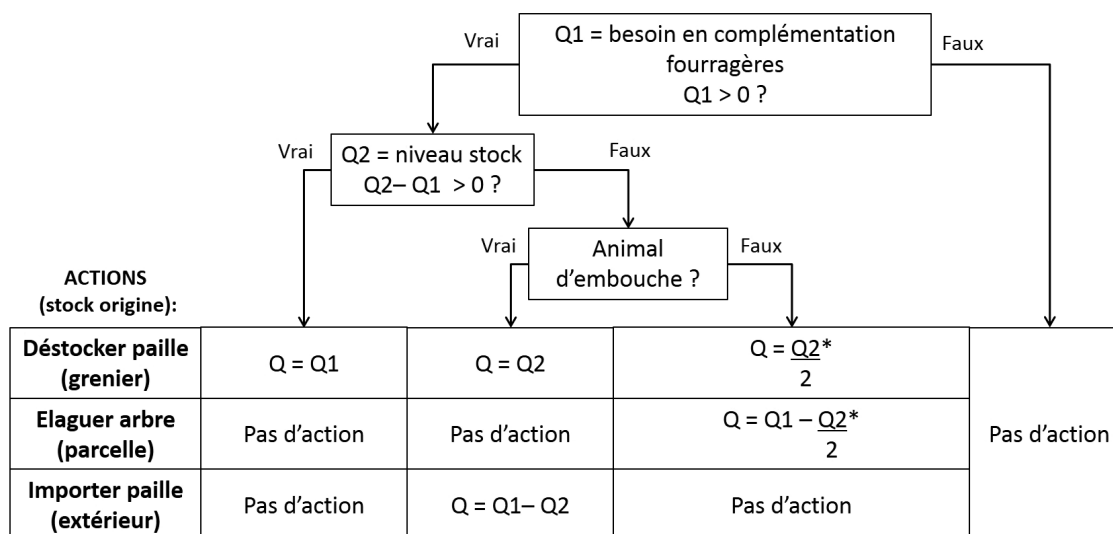
Le modèle de décision des ménages est formalisé par des arbres de décision correspondant à des règles « si-alors-sinon » qui définissent les opérations techniques à effectuer chaque jour et leur nature, *i.e.* les quantités de biomasse à déplacer, ainsi que les stocks sources et cibles. Cette représentation a été utilisée pour les opérations culturales (épandage, semis, récolte), d'élevage (alimentation, parage, achat/vente d'ani-

maux) et de consommation humaine (alimentation, consommation de combustibles).

La figure 4 présente l'exemple de la distribution de fourrages aux animaux. Un arbre décisionnel commun aux systèmes d'élevage a été construit. Deux indicateurs sont pris en compte : le besoin en complémentation fourragère des animaux (Q1) et le niveau des stocks de fourrages (Q2).

Pour les animaux conduits en extensif, le besoin Q1 est estimé en fonction de la disponibilité des fourrages au champ et sur parcours. Si la ressource est insuffisante, les éleveurs puisent dans leur stock de fourrage. Si toutefois le niveau du stock est faible, ils ralentissent son utilisation en émondant les arbres fourragers. Ils n'échangent ou n'achètent des fourrages qu'en cas d'extrême nécessité ; en année très sèche, ils peuvent être contraints de vendre une partie du cheptel.

Pour les animaux en embouche, les besoins évoluent essentiellement en fonction de leur état d'engraissement. Si le besoin n'est pas nul et le stock Q2 suffisant, l'éleveur puise dans ce stock. Les ménages pratiquant l'embouche ont recours à l'achat de fourrages en cas de stocks insuffisants, du fait de leurs trésoreries plus abondantes. Ainsi, plus le stock de fourrage Q2 est épuisé tôt (année sèche) plus les opérations d'émondage des arbres ou d'achats de fourrages auront lieu tôt.



*La division par deux traduit une anticipation du risque d'épuisement de stock, diminuant la vitesse d'utilisation du stock.

Fig. 4. Arbre de décision pour le choix de l'origine et de la quantité Q de fourrages apportés aux animaux quotidiennement.

Fig. 4. Decision tree for the origin and the daily quantity Q of forages given to animals.

4 Discussion

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

Les effets directs de la variabilité climatique sur les cultures sont déjà bien connus (Sultan *et al.*, 2013). Ils interviennent sur les dates des semis et des récoltes, ainsi que sur les quantités récoltées. De façon complémentaire, cette étude souligne un ensemble d'effets en cascade sur les activités agricoles. Par exemple, moins de ressources alimentaires pour les animaux en année n induit moins d'excréments animaux et donc moins de fumures disponibles pour les champs, ce qui se traduit par une baisse des rendements culturaux en année $n + 1$ (Sect. 2.2).

Les variations de la quantité de biomasse végétale produite dans le terroir impactent les activités agricoles dans leur calendrier mais également les flux de biomasse. Le calendrier cultural change chaque année en fonction de la répartition des pluies dans le temps, avec des effets sur les dates de récolte et les ressources fourragères, en particulier dans les systèmes vivriers (Sect. 2.1). L'organisation des flux entre les compartiments des ménages agricoles met en évidence le possible recours à des biomasses produites par d'autres (dans le terroir ou à l'extérieur) en cas d'année sèche (Sect. 2.2). L'élevage est davantage impacté par cette réorganisation que les cultures. Pour celles-ci, le sol joue un rôle tampon grâce à sa capacité à stocker/déstocker les nutriments apportés par la fertilisation organique. Les cultures peuvent bénéficier de l'arrière effet des apports conséquents de matière organique les années pluvieuses antérieures (Freschet *et al.*, 2008).

Les stocks de biomasse jouent un rôle tampon face à la variabilité climatique. Les niveaux de stock dans les greniers ou sur pied (arbres fourragers) permettent d'ajuster les rations distribuées aux animaux de sorte à retarder la période de soudure (Sect. 2.3). Des mécanismes similaires interviennent pour l'alimentation humaine (consommation de niébés en

frais). Les troupeaux ont aussi un rôle tampon grâce à leur capacité à valoriser des biomasses très diverses et à stocker/déstocker leurs réserves corporelles (Nozières *et al.*, 2011). Toutefois, si plusieurs années sèches se succèdent, des modifications au niveau stratégique de bien plus grande ampleur s'opèrent : transhumance, ventes d'animaux, etc. (Zampaligré *et al.*, 2014).

4.2 Au-delà de la sensibilité à l'aléa climatique

La typologie des ménages basée sur la prédominance des activités utilisée dans cette étude est semblable à d'autres typologies développées en Afrique de l'Ouest, par exemple celle de Vall *et al.* (2006) au Burkina Faso. Cette étude montre que les variations de pluviométrie impactent différemment les activités agricoles selon la sensibilité de chaque type de ménage.

Pour l'agriculture, les ménages vivriers ayant le moins de stocks alimentaires et de moyens financiers sont les plus dépendants de la pluviométrie. Les éleveurs sont particulièrement impactés par ces variations, car leurs animaux sont essentiellement alimentés avec des ressources fourragères locales. Les ajustements du calendrier fourrager se traduisent par une mobilisation variable des ressources disponibles dans le terroir. Moins d'ajustements sont *a priori* nécessaires pour les ménages rentiers, dont la majorité des biomasses mobilisées sont produites à l'extérieur du terroir (ex : les concentrés). Au-delà des variations de prix dues aux aléas pluviométriques, ces ménages sont plus sensibles à l'aléa économique, *i.e.* aux évolutions des prix des intrants, des cultures de rente et des produits animaux, que ne le sont les systèmes vivriers (Audouin *et al.*, 2015).

La cohabitation dans un même terroir de ménages de types différents peut conférer, de par leur complémentarité et leurs échanges, une adaptabilité à la communauté villageoise. Les ménages les moins sensibles à l'aléa pluviométrique peuvent

fournir de la biomasse aux plus sensibles les années sèches, notamment avec la vaine pâture et l'utilisation d'espaces communs (jachères et parcours). Réciproquement, les ménages vivriers peuvent aider les ménages rentiers à traverser une période peu favorable d'un point de vue économique sur les marchés (Audouin *et al.*, 2015). Une étude plus approfondie et quantitative intégrant les échanges au niveau du terroir pourra être effectuée par simulation à l'aide du modèle informatique à base d'agents que nous avons développé (*cf.* ci-dessous).

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

Ce travail propose un modèle d'action adaptatif face à l'aléa pluviométrique. Il peut être utilisé pour représenter les actions au sein de terroirs présentant une hétérogénéité de ménages et de pratiques agricoles. Le modèle d'action est basé sur des arbres de décision selon un format commun à tous les ménages, mais dont les indicateurs et les règles de décision diffèrent d'un type à l'autre, permettant ainsi de représenter une variété de comportements observés sur le terrain (Sect. 2.3). Se détacher des saisons-pratiques, en prenant en compte un grain temporel plus fin, permet d'intégrer des indicateurs qui peuvent évoluer différemment d'un ménage à l'autre (*e.g.* leurs stocks).

Le modèle d'action permet de représenter les réactions des ménages face aux variations de disponibilité de la biomasse, notamment liées à l'aléa pluviométrique. Il a été couplé à un modèle biophysique (*e.g.* croissance des cultures et pâturages) dans un modèle multi-agents (Grillot *et al.*, 2018). Ce dernier permet de conserver la singularité comportementale des ménages et des processus biophysiques, tout en représentant leurs interactions. L'utilisation d'un tel modèle permet d'étudier par simulation la flexibilité des agroécosystèmes (Dedieu et Ingrand, 2010). Différents types d'agroécosystèmes peuvent ainsi être comparés, selon les types de pratiques observées sur le terrain (élevage pastoral *versus* embouche) et la configuration paysagère des terroirs (paysages favorisant la mobilité des troupeaux *versus* entièrement cultivés).

5 Conclusion

Cette étude souligne les différents mécanismes d'ajustements des pratiques des ménages agricoles au niveau de gestion opérationnelle. Modéliser la gestion adaptative des biomasses à un pas de temps inférieur à la saison de pratique permet de prendre en compte les conséquences directes et indirectes de l'aléa pluviométrique sur les flux de biomasses dans les SASP d'Afrique de l'Ouest. L'aléa pluviométrique a des effets en cascade sur la réalisation des opérations techniques, selon la composition et l'orientation économique des ménages (rente *versus* vivrier, élevage *versus* cultures).

Nous recommandons l'intégration de ces mécanismes d'adaptation aux aléas, notamment pluviométrique, pour une représentation plus réaliste du fonctionnement des SASP dans les modèles de simulation. Le modèle d'action proposé ici permet de tenir compte de la diversité comportementale des ménages et de représenter ces mécanismes d'adaptation. Son intégration dans un modèle multi-agents vise à étudier la flexibilité des SASP face à l'aléa pluviométrique. La diversité

et la complémentarité des ménages pourront être analysées *via* les échanges de biomasse entre ménages. En outre, le modèle pourrait, à terme, être utilisé pour traiter plus largement de l'adaptation de ces systèmes au changement climatique global.

Remerciements. Ces travaux ont été financés par l'Agence nationale de la recherche française (ANR) (projet ANR-13-AGRO-002, CERA0, programme Agrobiosphère).

Références

- Andrieu N, Vayssières J, Corbeels M, Blanchard M, Vall E, Tittone P. 2015. From farm scale synergies to village scale trade-offs: cereal crop residues use in an agro-pastoral system of the Sudanian zone of Burkina Faso. *Agricultural Systems* 134: 84–96. DOI: [10.1016/j.agsy.2014.08.012](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.08.012).
- Aubry C, Papy F, Capillon A. 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems* 56: 45–65.
- Audouin E, Vayssières J, Odru M, Masse D, Doré GS, Delaunay V, *et al.* 2015. Réintroduire l'élevage pour accroître la durabilité des terroirs villageois d'Afrique de l'Ouest : le cas du bassin arachidier au Sénégal. In: Sultan B, Lalou R, *et al.*, editors. Les sociétés rurales face aux changements environnementaux en Afrique de l'Ouest. Marseille : IRD, pp. 403–427.
- Balandier ML. 2017. Describing diversity and crop-livestock integration in smallholder mixed farming systems in Sub-Saharan Africa (Master 2). Wageningen, Pays-Bas: Wageningen University.
- Bassett TJ, Blanc-Pamard C, Boutrais J. 2007. Constructing locality: the terroir approach in West Africa. *Africa* 77: 104–129. DOI: [10.3366/afr.2007.77.1.104](https://doi.org/10.3366/afr.2007.77.1.104).
- Dedieu B, Ingrand S. 2010. Incertitude et adaptation : cadres théoriques et application à l'analyse de la dynamique des systèmes d'élevage. *Productions Animales* 1: 81–90.
- Dounias I, Aubry C, Capillon A. 2002. Decision-making processes for crop management on African farms. Modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon. *Agricultural Systems* 73: 233–260.
- Freschet G, Masse D, Hien E, Sall S, Chotte J. 2008. Long-term changes in organic matter and microbial properties resulting from manuring practices in an arid cultivated soil in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 123: 175–184. DOI: [10.1016/j.agee.2007.05.012](https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.05.012).
- Grillot M, Guerrin F, Gaudou B, Masse D, Vayssières J. 2018. Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model. *Environmental Modelling & Software* 107: 267–280. DOI: [10.1016/j.envsoft.2018.05.003](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.003).
- Manlay RJ, Ickowicz A, Masse D, Feller C, Richard D. 2004. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna-II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural Systems* 79: 83–107. DOI: [10.1016/S0308-521X\(03\)00054-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00054-4).
- Nozières MO, Moulin CH, Dedieu B. 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *Animal* 5: 1442–1457. DOI: [10.1017/S1751731111000486](https://doi.org/10.1017/S1751731111000486).
- Sultan B, Roudier P, Quirion P, Alhassane A, Muller B, Dingkuhn M, *et al.* 2013. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters* 8. DOI: [10.1088/1748-9326/8/1/014040](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014040).
- Vall E, Dugué P, Blanchard M. 2006. Le tissage des relations agriculture-élevage au fil du coton. *Cahiers Agricultures* 15: 72–79.

Vayssières J, Lecomte P, Guerrin F, Nidumolu UB. 2007. Modelling farmers' action: decision rules capture methodology and formalisation structure: a case of biomass flow operations in dairy farms of a tropical island. *Animal* 1: 716–733. DOI: [10.1017/S1751731107696657](https://doi.org/10.1017/S1751731107696657).

Zampaligré N, Dossa LH, Schlecht E. 2014. Climate change and variability: perception and adaptation strategies of pastoralists and agro-pastoralists across different zones of Burkina Faso. *Regional Environmental Change* 14: 769–783. DOI: [10.1007/s10113-013-0532-5](https://doi.org/10.1007/s10113-013-0532-5).

Citation de l'article : Grillot M, Vayssières J, Guerrin F, Lecomte P. 2018. Modélisation conceptuelle de la gestion adaptative de la biomasse face à l'aléa climatique en systèmes agro-sylvopastoraux. *Cah. Agric.* 27: 55004.