



Université des Sciences et Techniques du Languedoc

Master "Sciences et technologies"
Mention "Ecologie Biodiversité"
Spécialité "Biodiversité Evolution"
Parcours "Ecosystèmes"

Projet de Recherche :

**Modélisation de la dynamique spatiale de l'azote
dans un agroécosystème subsaharien**

Par

Noémie PICHON

Stage de M2

Réalisé sous la direction de

Sébastien BAROT - Directeur de Recherche IRD IEES-P

Simon BOUDSOCQ - Chercheur INRA Eco&Sols

Tanguy DAUFRESNE - Chercheur INRA Eco&Sols

Raphaël MANLAY - Enseignant-chercheur AgroParisTech & Eco&Sols

UMR 210 Eco&Sols

Montpellier SupAgro - Cirad - INRA - IRD



Sommaire

I/ INTRODUCTION	1
II/ MATERIEL ET METHODE	2
DESCRIPTION DU TERROIR	2
DESCRIPTION DU MODELE	3
ANALYSE DU MODELE	4
III/ RESULTATS	5
A L'ECHELLE DU TERROIR	5
A L'ECHELLE DE L'AUREOLE	6
IV/ DISCUSSION	6
DISPARITION DE L'AUREOLE DE CASE ET DE LA SAVANE	6
ROLE DES HERBIVORES ET DU RECYCLAGE DES DECHETS PAR LE VILLAGE	7
CHOIX D'UNE FERTILISATION AZOTEE PAR DES INTRANTS MINERAUX OU PAR COMPLEMENTS ALIMENTAIRES APPORTES AUX HERBIVORES	8
AUTRES LEVIERS D'ACTION A L'ECHELLE DU TERROIR	8
EXTENSIONS POSSIBLES	9
V/ CONCLUSION	9

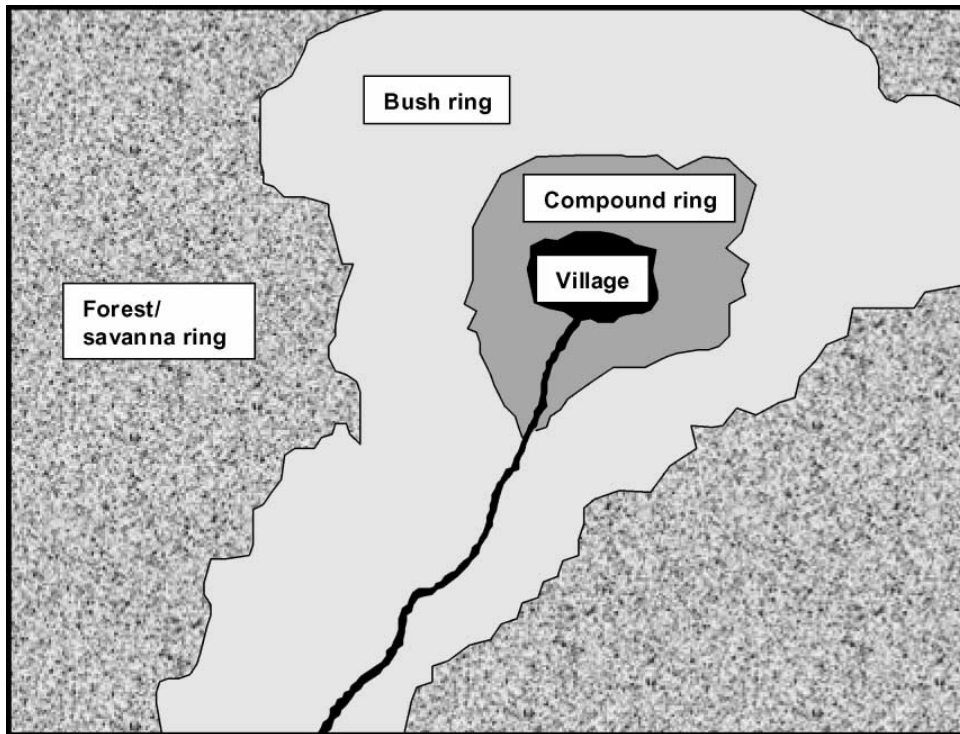


Figure 1 : Schéma simplifié du terroir (Manley *et al.*, 2002a).

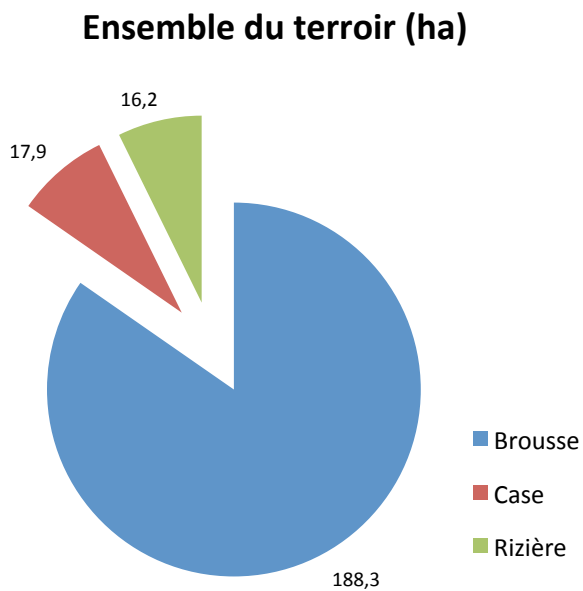


Figure 2 : Taille de chaque auréole pour l'ensemble du terroir.

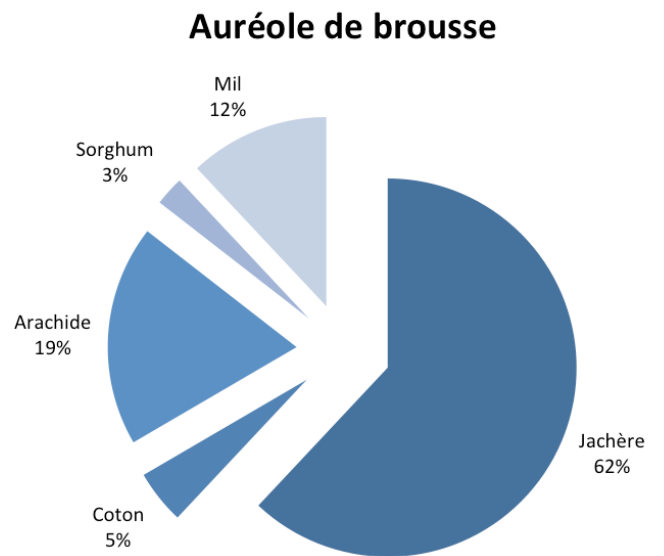


Figure 3 : Importance relative des différents modes d'utilisation de l'auréole de brousse.

I/ Introduction

La production végétale en Afrique Subsaharienne est limitée par de fortes contraintes climatiques et édaphiques. Les pluies sont irrégulières et réparties sur quelques mois de l'année. Les sols sont pauvres en colloïdes organo-minéraux et présentent une faible activité de surface, contraignant la production agricole (Pieri C., 1992). Cette région connaît la croissance démographique la plus importante au monde (2,8% entre 1970 et 1995, UNDP 1999). Pour répondre à la demande alimentaire, les pratiques agricoles sont intensifiées depuis une cinquantaine d'années au dépend des zones plus extensives de brousse et des zones de savane (Manlay *et al.*, 2002a). Les troupeaux comptent de plus en plus d'individus, et les agriculteurs sont de plus en plus nombreux à pratiquer l'embouche bovine. Cette pratique assure un revenu lors de la vente du bétail mais se traduit aussi par des pertes de nutriments pendant le stockage et l'épandage du fumier (Rufino *et al.*, 2006).

Le projet Cerao (Auto-adaptation des agro-socio-écosystèmes tropicaux face aux changements globaux) financé depuis 2014 par l'Agence Nationale de la Recherche décrit ces changements de pratique et vise à analyser l'impact conjoint de ces changements et des différentes contraintes sociales et environnementales pesant sur ces systèmes agricoles. Il réunit des laboratoires du Sénégal et de France, dont l'UMR Eco&Sols qui s'occupe notamment de la modélisation des cycles de nutriments.

L'azote représente l'un des facteurs limitants principaux de la production primaire dans les agroécosystèmes ouest africains (Pieri C., 1992) et la situation économique ne permet pas aux agriculteurs l'utilisation massive d'intrants azotés (Naasem and Kelly, 1999). Mon sujet de stage s'inscrit au sein du projet Cerao en étudiant la dynamique et l'utilisation de ce nutriment, l'azote, dans un écosystème agricole traditionnel du Sud du Sénégal qui a été décrit de façon très complète dans les travaux de Raphaël Manlay (Manlay, 2000).

La modélisation est utilisée couramment en écologie pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes en absence d'intervention humaine (Boudsocq *et al.*, 2009, de Mazancourt *et al.*, 1999), en simulant notamment le recyclage des nutriments. Le rôle de la structure spatiale à l'échelle des paysages dans les écosystèmes naturels a été conceptualisée en écologie avec la théorie des métaécosystèmes. Cette approche permet de considérer les composantes du terroir comme des puits ou des sources reliés par des flux de matière et d'organismes (Loreau *et al.*, 2003).

Le terroir d'où proviennent mes données est un agroécosystème présentant une forte structuration spatiale. L'approche métaécosystémique a été peu appliquée aux écosystèmes impactés par l'homme. L'organisation traditionnelle en auréoles du terroir nous permet cependant d'étudier son fonctionnement selon cette approche. Chaque auréole est une unité spatiale représentant un mode de gestion des terres différent. Considérer ces unités dans un même modèle permet d'analyser le fonctionnement du terroir à l'échelle globale et à l'échelle de l'auréole.

Ici les différentes composantes sont reliées par des flux d'azote principalement dus aux activités anthropiques : par les fèces grâce au passage des herbivores d'une zone à l'autre, par les récoltes et la redistribution des déchets du village sur les champs alentours. Les herbivores sont responsables de pertes d'azote, mais ils peuvent également favoriser la production végétale dans certains types d'écosystèmes peu anthropisés en accélérant le recyclage des nutriments (principe d'optimisation par l'herbivorie, de Mazancourt *et al.*, 1999, McNaughton, 1979). Les pertes nettes d'azote occasionnées par les flux sortant du terroir étudié sont dues aux activités humaines, mais aussi à la lixiviation, la dénitrification et l'évaporation de l'azote. L'évolution des pratiques agricoles nous pousse à réévaluer les effets de ces flux de transfert sur la fertilité du système.

Tableau 1 : Valeurs des paramètres et des stocks utilisés dans le modèle.

Paramètres du modèle

	Paramètre	Valeur	Unité	Description	Source
Auréole de brousse	a1	0,0100	an ⁻¹	Taux de minéralisation	
	b1	0,0414	ha.kgN ⁻¹ .an ⁻¹	Taux d'assimilation par les plantes	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	c1	0,8000	an ⁻¹	Mortalité, taux de dégradation des résidus	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	res1	0,1052	an ⁻¹	Taux de conversion plantes/résidus	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	ip1	0,0958	an ⁻¹	Taux d'assimilation d'N atmosphérique (arachides)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	op1	0,0289	an ⁻¹	Récoltes exportées (arachides)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	im1	7,0000	kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹	Déposition d'N minéral	J. Vayssières, pers. comm.
	om1	0,0228	an ⁻¹	Pertes d'N minéral (lixiviation + dénitrification)	Abbadie <i>et al.</i> , 2006
	od1	0,0019	an ⁻¹	Pertes d'N organique (lixiviation)	Abbadie <i>et al.</i> , 2006
	h1	0,0686	an ⁻¹	Récoltes	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	ab	188,3	ha	Taille de l'auréole	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	gb	47,00	%	Temps passé par le bétail sur l'auréole (journée)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	run1	0,0019	an ⁻¹	Lessivage vers la rizière	Abbadie <i>et al.</i> , 2006
	Auréole de case	a2	0,0100	an ⁻¹	Taux de minéralisation
b2		0,4231	ha.kgN ⁻¹ .an ⁻¹	Taux d'assimilation par les plantes	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
c2		0,8000	an ⁻¹	Mortalité, taux de dégradation des résidus	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
res2		0,7268	an ⁻¹	Taux de conversion plantes/résidus	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
im2		7,0000	kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹	Déposition d'N minéral	J. Vayssières, pers. comm.
om2		0,0186	an ⁻¹	Pertes d'N minéral (lixiviation + dénitrification)	Abbadie <i>et al.</i> , 2006
od2		0,0016	an ⁻¹	Pertes d'N organique (lixiviation)	Abbadie <i>et al.</i> , 2006
h2		0,2732	an ⁻¹	Récoltes	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
ac		17,9	ha	Taille de l'auréole	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
run2		0,0016	an ⁻¹	Lessivage vers la rizière	Abbadie <i>et al.</i> , 2006
Rizière		a3	0,0100	an ⁻¹	Taux de minéralisation
	b3	0,0906	ha.kgN ⁻¹ .an ⁻¹	Taux d'assimilation par les plantes	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	c3	0,8000	an ⁻¹	Mortalité, taux de dégradation des résidus	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	res3	0,8462	an ⁻¹	Taux de conversion plantes/résidus	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	im3	7,0000	kgN.ha ⁻¹ .an ⁻¹	Déposition d'N minéral	J. Vayssières, pers. comm.
	om3	0,0073	an ⁻¹	Pertes d'N minéral (lixiviation + dénitrification)	Abbadie <i>et al.</i> , 2006
	od3	0,0012	an ⁻¹	Pertes d'N organique (lixiviation)	Abbadie <i>et al.</i> , 2006
	h3	0,1538	an ⁻¹	Récoltes	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	ar	16,2	ha	Taille de l'auréole	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	gr	47,00	%	Temps passé par le bétail sur l'auréole (journée)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
Savane	as	∈ [0;1]		Taille de l'auréole	
	gs	47 %		Temps passé par le bétail sur l'auréole (journée)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
Village	v	70,0 %		Efficacité de recyclage des déchets par le village	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
Bétail (410 UBT)	H0	6,5749*as	kgN.TLU ⁻¹ .an ⁻¹	Pression de pâturage sur l'auréole de savane	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	H1	0,4597	1/(TLU.ha.an)	Pression de pâturage sur l'auréole de brousse	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	H2	0,3164	1/(TLU.ha.an)	Pression de pâturage sur l'auréole de case	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	H3	0,1206	1/(TLU.ha.an)	Pression de pâturage sur l'auréole de rizière	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b
	losscat	36 %		Efficacité de recyclage des herbivores	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a et b

Stocks d'azote

Type d'auréole	Nom	Valeur	Unité	Description	Source
Auréole de brousse	P1	154,29	kgN.ha ⁻¹	Stock plantes : jachère, arachides, maïs, mil, coton	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
	R1	81,18	kgN.ha ⁻¹	Résidus de plantes	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
	D1	1301,52	kgN.ha ⁻¹	N organique du sol (0-20 cm)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
	M1	13,15	kgN.ha ⁻¹	N minéral du sol (0-20 cm)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
Auréole de case	P2	54,91	kgN.ha ⁻¹	Stock plantes : maïs, mil, maïs + mil	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
	R2	42,12	kgN.ha ⁻¹	Résidus de plantes	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
	D2	1598,64	kgN.ha ⁻¹	N organique du sol (0-20 cm)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
	M2	16,15	kgN.ha ⁻¹	N minéral du sol (0-20 cm)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
Rizière	P3	52,00	kgN.ha ⁻¹	Stock plante : riz	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
	R3	44,20	kgN.ha ⁻¹	Résidus de plantes	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
	D3	4096,26	kgN.ha ⁻¹	N organique du sol (0-20 cm)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a
	M3	41,38	kgN.ha ⁻¹	N minéral du sol (0-20 cm)	Manlay <i>et. al.</i> , 2004a

Comment répondre à la demande d'intensification agricole dans une région aux ressources en azote limitées ? Les changements de pratiques actuels permettent-ils un recyclage plus ou moins efficace de l'azote du terroir ? Quels sont les flux modulables pouvant diminuer les pertes en azote ?

Pour répondre à ces questions nous avons développé un modèle mathématique simplifié du terroir simulant les flux d'azote au sein des différentes sous-unités du terroir, entre ces sous-unités, et entre ces sous-unités et l'extérieur du terroir. En faisant varier les paramètres du modèle, je vais étudier l'effet d'une diminution des zones de culture extensive, ainsi que l'augmentation du nombre d'herbivores. Je vais faire varier l'importance du recyclage des déchets par le village. Je vais également comparer les rendements selon différents scénarii de fertilisation azotée : par l'apport d'intrants minéraux sur les champs de case, ou par un enrichissement des fèces en azote grâce à des compléments alimentaires.

II/ Matériel et méthode

Description du terroir

Mon travail se base sur des données acquises entre 1993 et 1997 et rapportées dans la thèse de doctorat de R. Manlay (2000). Ces données proviennent du terroir de Sare Yorobana situé en Haute Casamance (département de Kolda), au sud du Sénégal. Le climat est tropical sec, soudanien, avec des précipitations annuelles moyennes de 960 mm entre 1980 et 2000. Les sols sont pauvres en nutriments, lesquels sont concentrés dans la biomasse végétale (Manlay *et al.*, 2004a). L'organisation traditionnelle de ce terroir ainsi que les pratiques agricoles et pastorales et le maintien de la fertilité sont représentatifs des terroirs de la savane ouest africaine (Manlay *et al.*, 2002a).

Le terroir s'organise en auréoles concentriques autour des habitations (Figure 1 et 2). L'auréole de case est composée de champs de mil et de maïs. L'auréole de brousse comprend plus de 60% de jachères. Les 40% restant sont composés essentiellement de champs de mil en rotation avec des cultures d'arachides (Figure 3). L'auréole de savane comporte une strate arborée et arbustive très développée, ainsi que des herbacées essentiellement annuelles (Manlay *et al.*, 2002a). Elle subit peu de pression anthropique. C'est une zone de pâturage pour le bétail, et de réserve de bois de chauffage et de construction. Le village possède en bas de pente une palmeraie et une rizière. La palmeraie ne jouant pas un rôle majeur dans les transferts d'azote (strate herbacée et sol pauvres en nutriments, utilisation principalement de l'huile et du bois Manlay *et al.* 2004a), nous modéliserons la dynamique de l'azote sur les trois auréoles suivantes : rizière, case et brousse (Figure 2).

Dans notre modèle, l'ensemble de ces trois auréoles constitue le terroir. Bien qu'en réalité la savane fasse partie intégrante du terroir, nous ne nous intéressons pas ici au maintien de sa fertilité. C'est pourquoi nous ne la modélisons pas explicitement en termes de stock d'azote. Nous considérons néanmoins explicitement le flux d'azote net provenant de la savane, et qui est transféré par le bétail de la savane vers l'auréole de case (Figure 4).

La saison des pluies s'étend de Mai à Octobre. En dehors de cette période, les troupeaux de bovins (race locale *Ndama* de l'espèce *Bos taurus*) pâturent dans les champs, les jachères

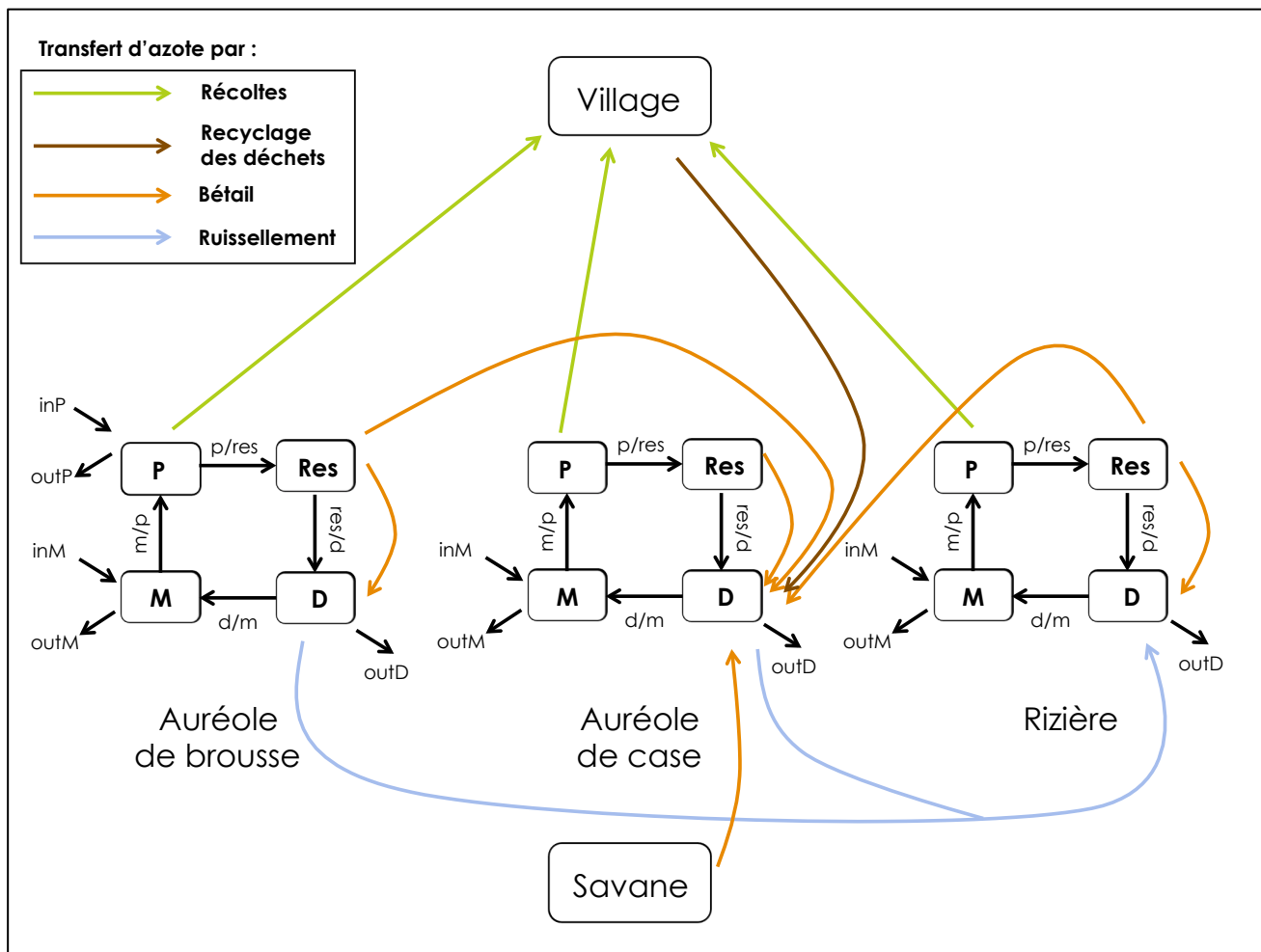


Figure 4 : Schéma conceptuel du modèle.

Tableau 2 :

Récoltes sur l'ensemble du terroir en $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ selon la surface relative de l'auréole de brousse, selon le nombre d'UBT et selon le type de fertilisation azotée. La scénario de base du terroir de Sare Yorobana est indiqué en rouge.

Auréole de brousse	Intrants minéraux		Pas d'ajout d'azote		Compléments alimentaires	
	91%	9%	91%	9%	91%	9%
205 UBT	26,01	19,11	23,93	12,06	24,44	15,17
410 UBT	21,34	15,94	19,67	14,38	20,49	13,35
615 UBT	19,05	14,12	17,53	10,77	18,63	12,45

et la savane pendant la journée. Ils sont parqués pendant la nuit sur l'auréole de case près des habitations. Cette pratique permet un transfert de matière organique depuis l'ensemble du terroir et de la savane vers les champs de case, et le maintien de leur fertilité. La totalité des troupeaux compte 410 Unités de Bétail Tropical (1 UBT = 250 kg de poids vif animal). Ce nombre est maintenu constant par le village (Manlay *et al.*, 2004b).

Les déchets ménagers sont épandus autour des habitations. La part de l'azote des récoltes ainsi recyclée est estimée à 70% (Manlay *et al.*, 2004b). Ce chiffre correspond aux restes de repas et aux parties non consommées des récoltes (épis de mil, de maïs...).

Le maintien de la fertilité des champs de brousse est assuré par les jachères ainsi que par la fixation de l'azote atmosphérique par les arachides lors des rotations de cultures. L'intégralité des cultures d'arachides est exportée du terroir, les fanes étant vendues comme fourrage.

La rizière bénéficie du ruissellement de la matière organique depuis les auréoles en amont.

Description du modèle

Notre modèle simplifie le fonctionnement des auréoles du terroir afin de rendre possible l'interprétation des résultats tirés de son analyse. Ce type de modèle s'inspire de modèles des cycles biogéochimiques utilisés en écologie des écosystèmes. Ils sont constitués d'équations du type ressource-consommateur utilisées en dynamique des populations, qui sont étendues à l'échelle de l'écosystème.

Chaque auréole est décrite par un cycle de l'azote entre 4 stocks:

- les plantes : parties aériennes et racinaires ("*P*")
- les résidus : plantes après récolte, au maximum 20 % du stock est ingéré par le bétail, le reste étant piétiné ou souillé par les déjections ("*Res*")
- l'ensemble matière organique du sol (dans la strate 0-20 cm) + litière ("*D*")
- l'azote minéral du sol (dans la strate 0-20 cm) ("*M*")

L'azote du sol n'est considéré que jusqu'à une profondeur de 20 cm. En effet la teneur en azote en dessous de cette limite n'est que peu influencée par la présence de cultures ou par le type de cultures (Manlay *et al.*, 2004a).

La biomasse végétale est séparée en deux stocks, le stock "Plantes" et le stock "Résidus" afin de respecter la dynamique temporelle du terroir. Les récoltes sont représentées par un flux partant du stock "Plantes" correspondant à la fin de la période de culture. Puis les troupeaux viennent s'alimenter lors de la saison sèche en résidus de récoltes laissés sur place (stock "Résidus").

J'ai paramétré le modèle à partir de la thèse de Raphaël Manlay, de données issues de l'écosystème de Lamto (Abbadie, 2006) et de mesures de terrain à Sare Yorobana fournies par Jonathan Vayssières (Cirad, Dakar). Les paramètres, leur unité et leur provenance sont décrits dans le Tableau 1.

Les stocks sont reliés entre eux par des flux internes à chaque auréole: minéralisation de l'azote organique ("*a*"), assimilation par les plantes ("*b*"), transformation des plantes en résidus ("*res*"), décomposition des résidus ("*c*"). Chaque stock possède des flux d'entrée ("*in*") et de sortie ("*out*") variables pour chaque auréole, représentant les gains et pertes pour l'ensemble du terroir par fixation, déposition, lixiviation, dénitrification (Tableau 1). Les auréoles sont quant à elles reliées par des flux correspondant au transfert par les herbivores, au recyclage des récoltes par le village, et au ruissellement de la matière organique (Figure 4). Les herbivores engendrent des pertes dues essentiellement à l'évaporation de l'azote contenu dans les urines, mais aussi à la volatilisation, à la dénitrification et au lessivage des

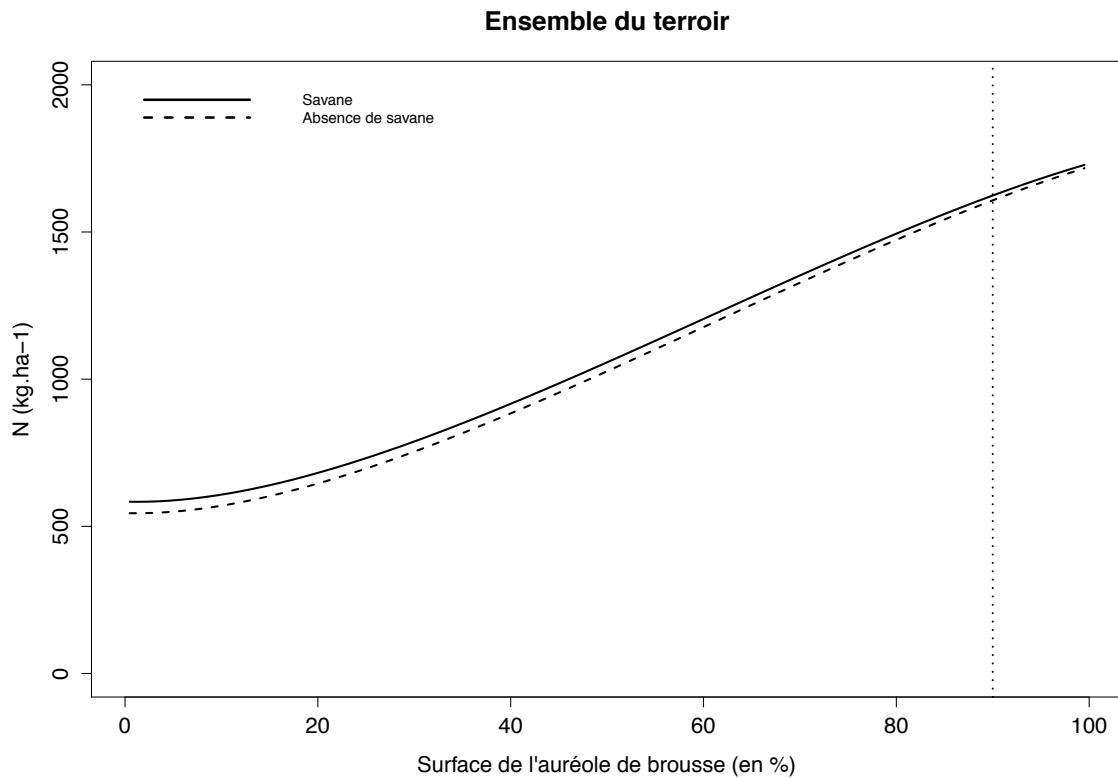


Figure 5 : Stock d'azote de l'ensemble du terroir en fonction de la surface relative de l'auréole de brousse. La ligne verticale pointillée indique la surface relative de l'auréole de brousse sur le terroir de Sare Yorobana.

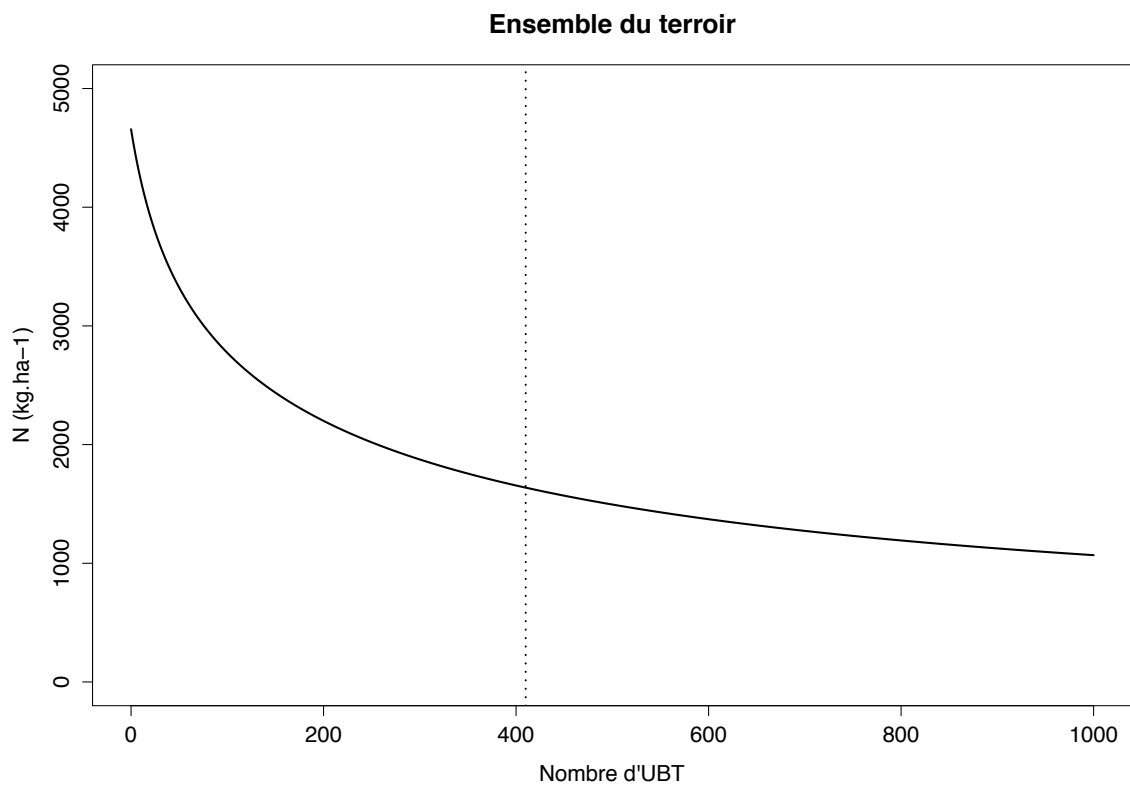


Figure 6 : Stock d'azote de l'ensemble du terroir en fonction du nombre d'UBT. La ligne pointillée verticale représente le nombre actuel d'UBT sur le terroir de Sare Yorobana en pointillés.

fèces. La savane est modélisée par un flux entrant d'azote organique sur l'auréole de case, correspondant aux fèces déposés pendant la nuit par les herbivores qui ont pâturé pendant la journée dans la savane. Le nombre d'herbivores est considéré comme fixe pour chaque simulation. La taille du troupeau dépend en effet du nombre d'habitants et non de la dynamique des auréoles.

Les transferts de nutriments d'une auréole vers l'autre (recyclage par le village, fèces, ruissellement) sont considérés comme distribués de façon uniforme depuis et sur l'ensemble de l'auréole. Il en va de même pour tous les flux d'entrée et de sortie du modèle.

Le modèle se compose d'un système d'équations différentielles décrivant la variation de chaque stock en fonction du temps. Je l'ai programmé grâce au logiciel R (version 3.1.2 - "Pumpkin Helmet", R Core Team 2014) et au package deSolve (Soetaert *et al.*, 2010). La variation des stocks est "donor-controlled" ou "resource-controlled" (de Mazancourt *et al.*, 1999) c'est-à-dire proportionnelle au stock de départ ou d'arrivée. Le stock "Plantes" varie en fonction des deux : azote minéral (départ) et plantes (arrivée). Cette équation est de type Lotka-Volterra.

Pour chaque auréole, la forme générale des équations est la suivante:

N biomasse plantes :

$$dP/dt = (inp - outp + b * M - res) * P - P * h$$

N résidus de plantes :

$$dRes/dt = res * P - c * Res - (Res * cat * H)/ax$$

Norganique :

$$dD/dt = + c * Res + (Res * cat * H * losscat * gx)/ax - a * D - outd * D - run * D$$

Nminéral :

$$dM/dt = + inm - outm * M + a * D - b * M * P$$

avec "*h*" le taux de récoltes, "*ax*" la surface de l'auréole, "*H*" la pression d'herbivorie par auréole, "*cat*" le nombre d'herbivores, "*losscat*" la part d'azote ingérée par les herbivores retrouvée dans les fèces, "*gx*" le temps passé par les herbivores pendant la journée sur l'auréole, et "*run*" le ruissellement de l'azote organique vers la rizière en bas de pente.

Les paramètres sont décrits dans le Tableau 1. Le système d'équations complet est décrit dans l'Annexe 1.

Les équations ne pouvant pas être résolues simplement par méthode analytique, les simulations sont lancées sur un temps très long (5000 ans) afin d'obtenir des valeurs de stocks et de flux à l'équilibre.

Analyse du modèle

L'analyse de notre modèle va permettre de répondre aux questions écologiques suivantes : Comment se comporte l'ensemble du terroir d'un point de vue de la ressource en azote lorsque l'utilisation des terres est plus intensive (disparition de la savane, disparition de la brousse, fertilisation azotée) ? Dans quel sens et dans quelle mesure le nombre d'herbivores des troupeaux influe-t-il sur le flux de récoltes au niveau du système entier et au niveau de chaque auréole ?

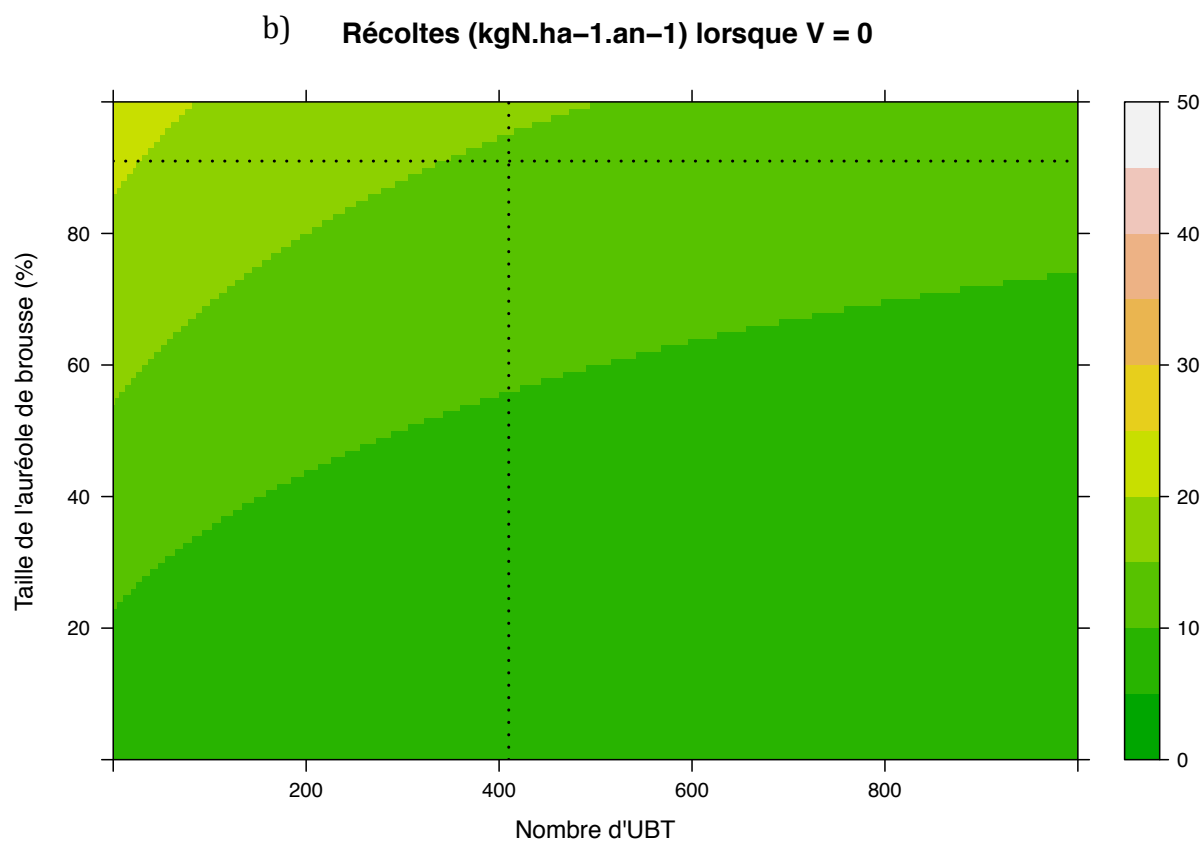
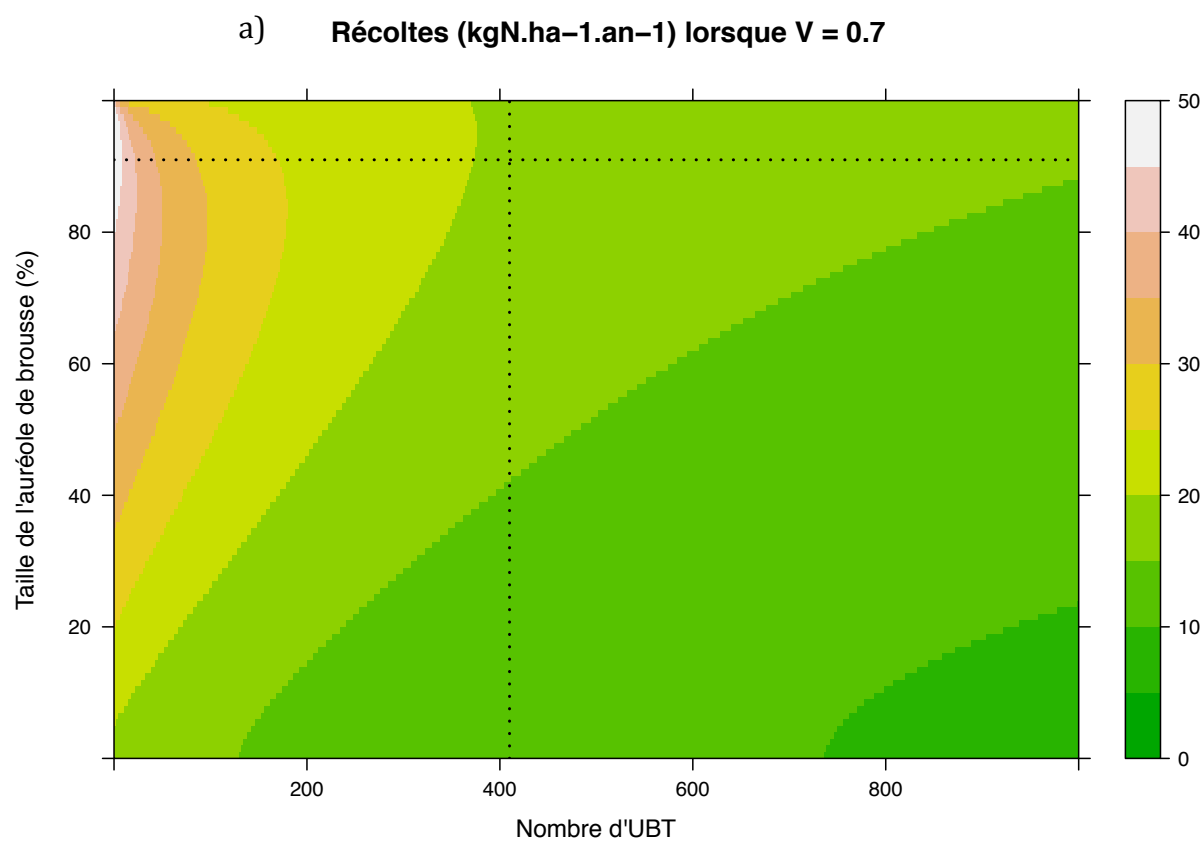


Figure 7 :
 Taux de récolte en fonction de la taille relative de l'auréole de brousse et du nombre d'UBT. a) Lorsque le recyclage des récoltes par le village = 70% et b) lorsqu'il est nul. Les lignes pointillées représentent le scénario actuel du village de Sare Yorobana.

Afin de visualiser les effets des changements de pratique, nous avons simulé plusieurs scénarii et leurs effets croisés :

- variation de la taille relative de l'auréole de brousse par rapport à l'ensemble case/brousse (paramètres "*ab*" et "*ac*"), correspondant à une intensification actuelle des pratiques pour la demande en cultures vivrières
- variation du nombre total d'herbivores (paramètre "*cat*"), suivant une croissance démographique théorique du village
- variation du taux de recyclage par le village (paramètre "*v*"), présentant une grande sensibilité dans le modèle et pouvant être déterminant pour l'estimation des pertes au niveau de l'auréole de case
- disparition du flux d'entrée provenant de la savane (paramètre "*as*"), qui traduit la disparition actuelle de l'auréole de savane au profit des cultures
- effet de l'ajout d'intrants minéraux comparé à l'effet de l'ajout de compléments alimentaires pour les herbivores, qui simule une intensification de la production végétale pour répondre à la demande croissante en cultures vivrières.

J'ai également effectué une analyse de sensibilité du modèle à la variation de ses paramètres. Pour cela, j'ai simulé la variation du flux de récoltes en fonction de l'augmentation ou de la diminution de 10% de chaque paramètre. Les résultats sont présentés en Annexe 2. L'analyse de la sensibilité du modèle permet de déterminer les paramètres qui influent le plus sur les sorties du modèle, et d'identifier les possibles leviers d'actions pour augmenter les flux de récoltes du terroir.

III/ Résultats

Les effets sur la productivité végétale du nombre d'herbivores, de la taille relative des auréoles, du recyclage par le village et du mode de fertilisation azotée sont décrits pour l'ensemble du terroir puis à l'échelle de chaque auréole.

A l'échelle du terroir

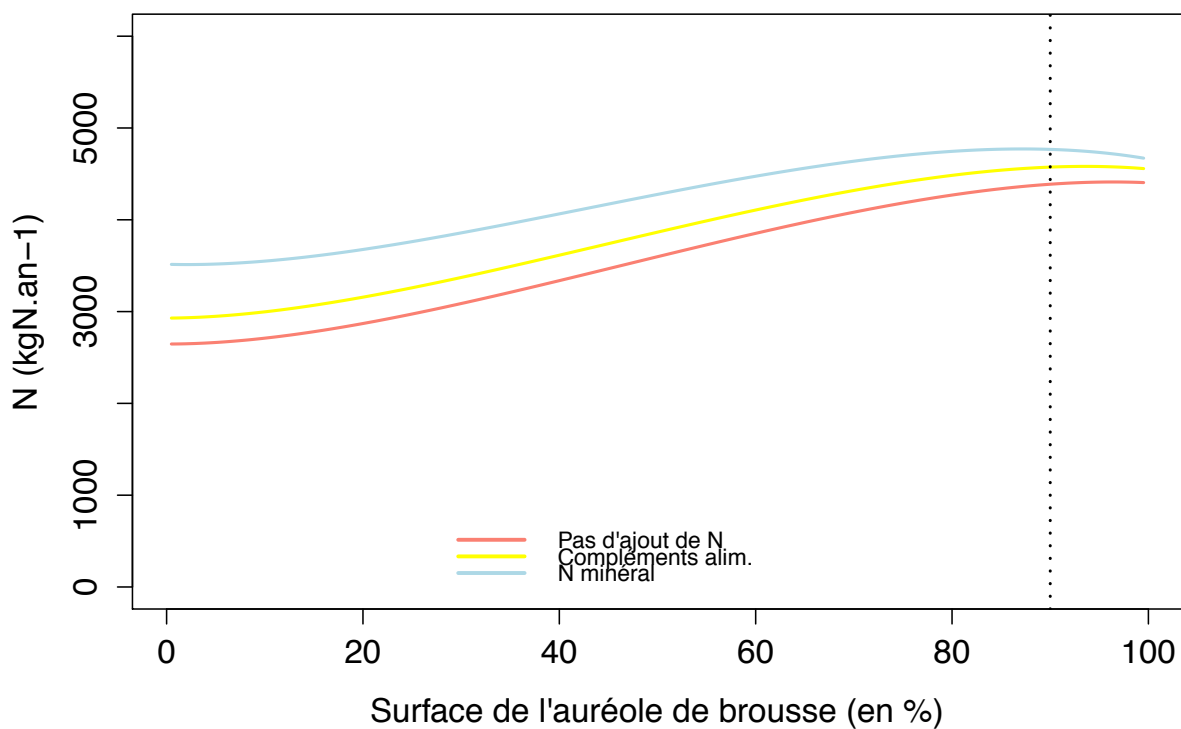
La diminution de la taille relative de l'auréole de brousse (Figure 5) ainsi que l'augmentation de la taille du troupeau d'herbivores (Figure 6) sont deux cas simulés entraînant une perte d'azote au niveau de l'ensemble du terroir (voir aussi Tableau 2).

En effet l'auréole de brousse possède un taux de sorties par les récoltes (paramètre "*h*") moins important que celui de l'auréole de case. Quant aux herbivores, les pertes qu'ils engendrent ("*losscat*") ne compensent pas l'éventuel effet positif du transfert de matière organique depuis les zones non cultivées.

Pour une pression de pâturage de 350 UBT maximum, le flux de récoltes est le plus élevé lorsque la surface de la zone de brousse atteint environ 80-90%. Cette zone d'optimum ne peut pas être observée si le recyclage par le village est trop faible (Figure 7).

Une disparition de l'auréole de savane ne provoque pas de variation notable du stock d'azote total (Figure 5). Le temps de pâturage permettant le transfert d'azote par les fèces y est en effet relativement plus court que sur les autres auréoles (paramètre "*H0*").

a) Récolte au niveau du terroir



b) Auréole de brousse Stock d'azote des plantes

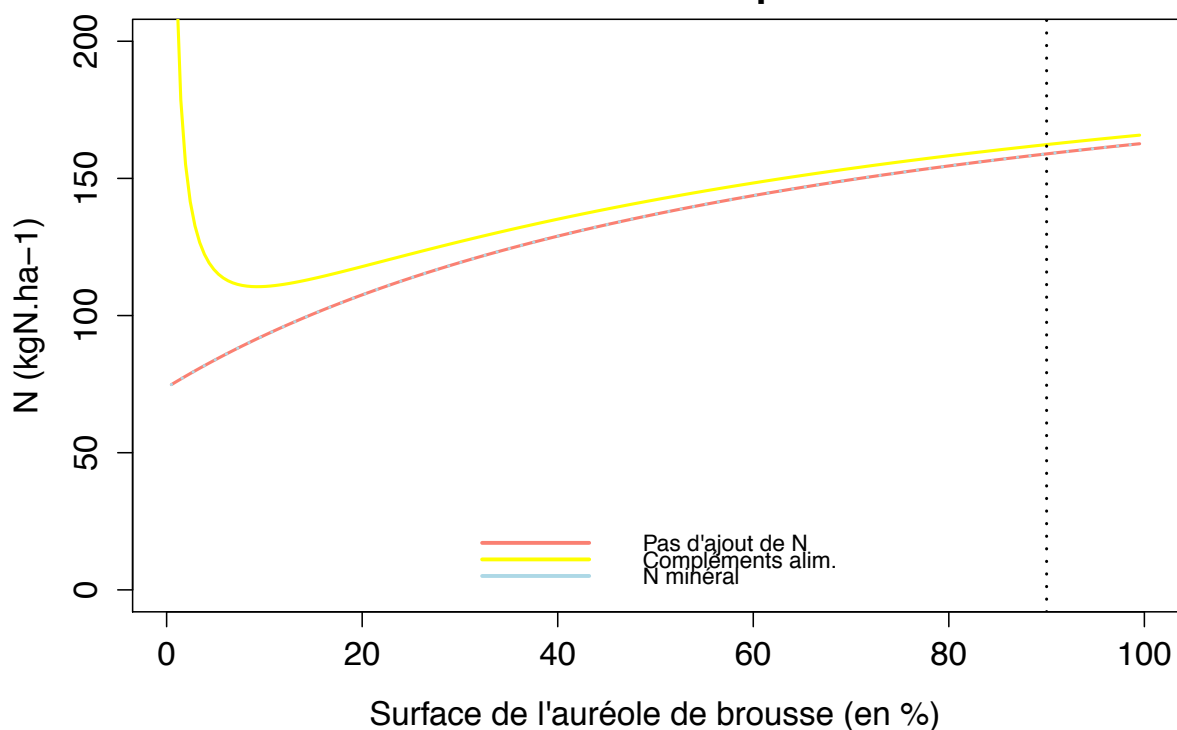


Figure 8 a et b : Effet des deux scénarii de fertilisation azotée au niveau des récoltes (a) et de l'auréole de brousse (b). Taille de l'auréole de brousse de Sare Yorobana en pointillés.

La Figure 8(a) compare deux scénarii d'apport d'azote : soit par des intrants minéraux sur l'auréole de case, soit par des compléments alimentaires pour les herbivores. Les récoltes au niveau du terroir sont plus abondantes lorsque l'apport est d'origine minérale. La différence entre les deux types d'apport s'amenuise lorsque la surface de l'auréole de brousse atteint 80% de l'ensemble brousse-case. Il existe un optimum pour l'ajout d'intrants minéraux autour de 90% d'auréole de brousse.

Les valeurs du flux de récolte selon chaque scénario sont indiquées dans le Tableau 2.

A l'échelle de l'auréole

Lorsque le recyclage des déchets par le village est nul (paramètre "v" égal à 0) nous observons sur l'auréole de case une augmentation du stock d'azote des plantes en fonction du nombre d'herbivores. La courbe est en U pour le paramètre "v" compris entre 0.1 et 0.2 : diminution puis augmentation du stock d'azote des plantes (Figure 9).

L'auréole de case bénéficie des entrées d'azote organique depuis la brousse. Si la surface relative de l'auréole de case diminue, ces entrées se répartissent sur une surface réduite. Nous observons donc une concentration du stock d'azote total sur les champs de case (Figure 10).

La rizière reçoit un flux d'azote par le ruissellement depuis les deux autres auréoles et suit par conséquent leur dynamique.

Chaque auréole dans la Figure 8 (b, c et d) présente une dynamique différente selon le scénario de fertilisation. Les champs de brousse (8b) présentent un meilleur flux de récolte pour une fertilisation par les fèces enrichis aux compléments alimentaires. Les champs de case (8c) reçoivent directement l'azote minéral et sont donc plus productifs dans ce cas. Le meilleur scénario pour augmenter les rendements de la rizière dépendra de la taille relative des auréoles en amont. Celui où l'azote est apporté par les fèces sera plus efficace dans le cas où l'auréole de brousse représente au moins 80% de l'ensemble brousse-case. C'est le cas du terroir de Sare Yorobana (Figure 8d, ligne verticale en pointillées).

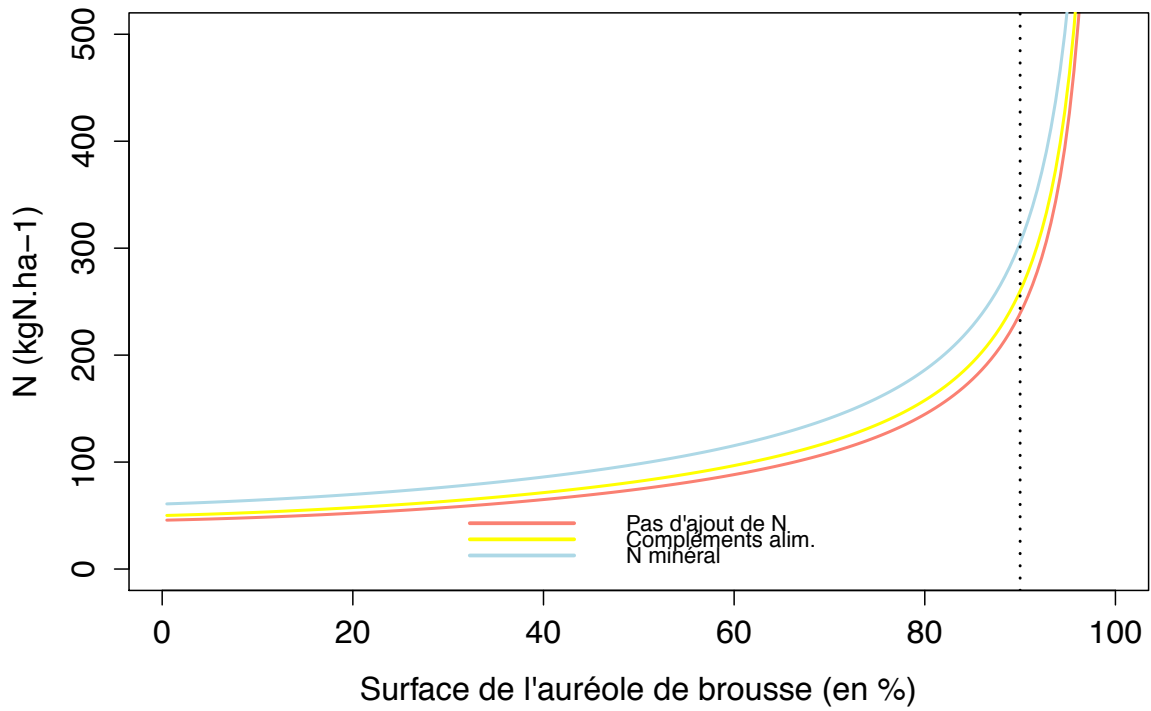
IV/ Discussion

En résumé, les résultats présentés dans la section précédente indiquent qu'une extension de la zone de cultures vivrières (auréole de case) par rapport à l'auréole de brousse entraîne des pertes d'azote au niveau du terroir, tout comme l'augmentation du nombre d'herbivores des troupeaux. Nous allons discuter ces résultats séparément, couplés entre eux, et couplés avec le taux de recyclage du village ainsi que le type de fertilisation azotée.

Disparition de l'auréole de case et de la savane

La disparition progressive des jachères et cultures de rente au profit des cultures vivrières de mil et de maïs assure à court terme la sécurité alimentaire du village. D'après notre modèle, elle se traduit cependant par une diminution du stock total d'azote sur l'ensemble du terroir dues au plus fort taux de sortie par les récoltes (Figure 5). Sans jachères, et sans intrants disponibles, la fertilité est plus difficile à maintenir (Manlay *et al.*, 2002b, et Ker, 1995). L'auréole de savane est traduite dans le modèle par un flux entrant de fèces vers l'auréole de case. Les herbivores passent relativement peu de temps en savane à

c) **Auréole de case**
Stock d'azote des plantes



d) **Auréole de rizière**
Stock d'azote des plantes

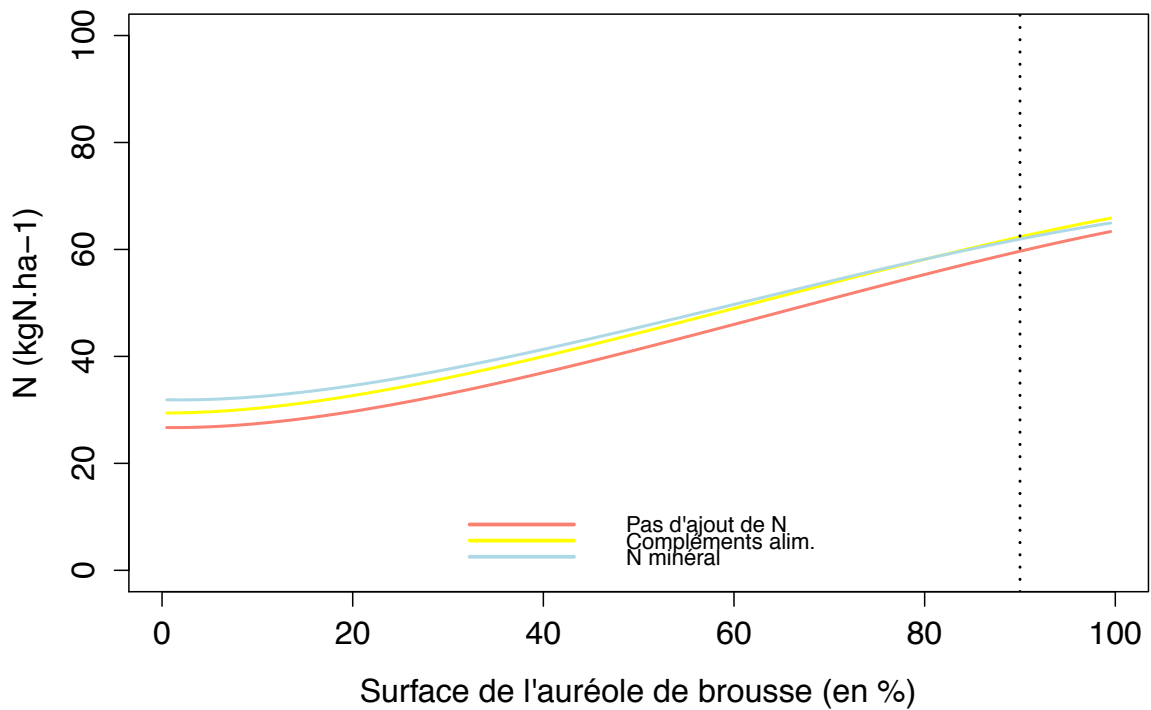


Figure 8 c et d : Effet des deux scénarii de fertilisation azotée au niveau de l'auréole de case (c) et de la rizière (d). Taille de l'auréole de brousse de Sare Yorobana en pointillés.

cause de l'absence de points d'eau. Sa disparition affecte donc peu la teneur en azote totale du terroir (Figure 5). Cette auréole est en revanche utilisée pour la pâture pendant la saison des pluies. Son absence nécessiterait pendant cette saison le déplacement des troupeaux plus loin des concessions, comme c'est le cas sur le terroir de Niakhar (bassin arachidier).

Rôle des herbivores et du recyclage des déchets par le village

L'optimisation de la production végétale par les herbivores (McNaughton, 1979) n'est pas observée dans notre modèle. Pour des valeurs du recyclage par le village (paramètre "v") entre 0.1 et 0.2 la production sur l'auréole de case diminue à cause des pertes d'azote engendrées par le pâturage. Puis la production augmente jusqu'à une pression d'herbivorie de 1000 UBT grâce à la redistribution de l'azote par les fèces depuis l'ensemble du terroir vers l'auréole de case. Lorsque $v = 0$, la production végétale est plus faible mais son augmentation est continue (Figure 9).

En comparaison, des travaux de modélisation menés dans un écosystème peu anthropisé (Lamto, Côte d'Ivoire) montrent que l'optimisation de la production végétale par les herbivores est possible : à court terme (dizaines d'années) lorsque les pertes sont inférieures à 24% d'N ingéré par les herbivores, et à long terme (centaines d'années) lorsqu'elles sont inférieures à 19%. Ces pertes faibles signifient que les déjections contiennent jusqu'à 81% de l'azote ingéré par l'animal. La production primaire augmente même lorsque la pression d'herbivorie atteint 80 à 90% de production primaire ingérée. Cet effet est essentiellement dû à la protection contre le feu. Les nutriments sont consommés avant que les parties aériennes des plantes ne soient brûlées, et sont moins sujets aux pertes lorsqu'ils sont contenus dans les fèces (de Mazancourt *et al.*, 1999).

Dans notre modèle, les pertes d'azote dues à l'évaporation du NH_4 de l'urine et à la volatilisation, à la dénitrification et au lessivage des fèces sont trop importantes pour observer une augmentation nette des rendements lors d'une augmentation du nombre d'herbivores. Le terroir de Sare Yorobana ne subit pas ou peu de pertes par le feu contrairement à Lamto. Ces résultats sont cependant à replacer dans un contexte économique où les herbivores sont une source de revenus (lait, viande) et peuvent compenser les pertes d'azote qu'ils engendrent. Le recyclage des déchets du village a été considéré comme uniforme sur l'ensemble de l'auréole de case. En pratique, les déchets sont dispersés dans les champs directement adjacents aux habitations. Le reste de l'auréole profite donc bien du recyclage par les herbivores. L'auréole de case est un puits et sa fertilité est par conséquent maintenue par un gradient de pratiques agricoles : recyclage des déchets pour les champs les plus proches du village, et apport d'azote par les fèces des herbivores pour le reste de l'auréole.

Mais la pression d'herbivorie ne se résume pas aux seuls ruminants. Les termites tiennent un rôle important dans le recyclage de la matière organique morte (Jones, 1990, Manlay *et al.*, 2004c, Rouland *et al.*, 2003) et les plantes qui ne sont pas ingérées par le bétail le sont par les termites. Ils concentrent dans la termitière les nutriments contenus dans la biomasse ingérée, et vont éviter certaines pertes par lixiviation ou volatilisation. Bien que connaissant leur impact sur la répartition et la qualité de la matière organique du sol, les termites ne sont pas représentés dans notre modèle. Leur présence remet donc en question l'hypothèse d'une distribution spatiale homogène de l'azote du sol en particulier sur le champ de brousse.

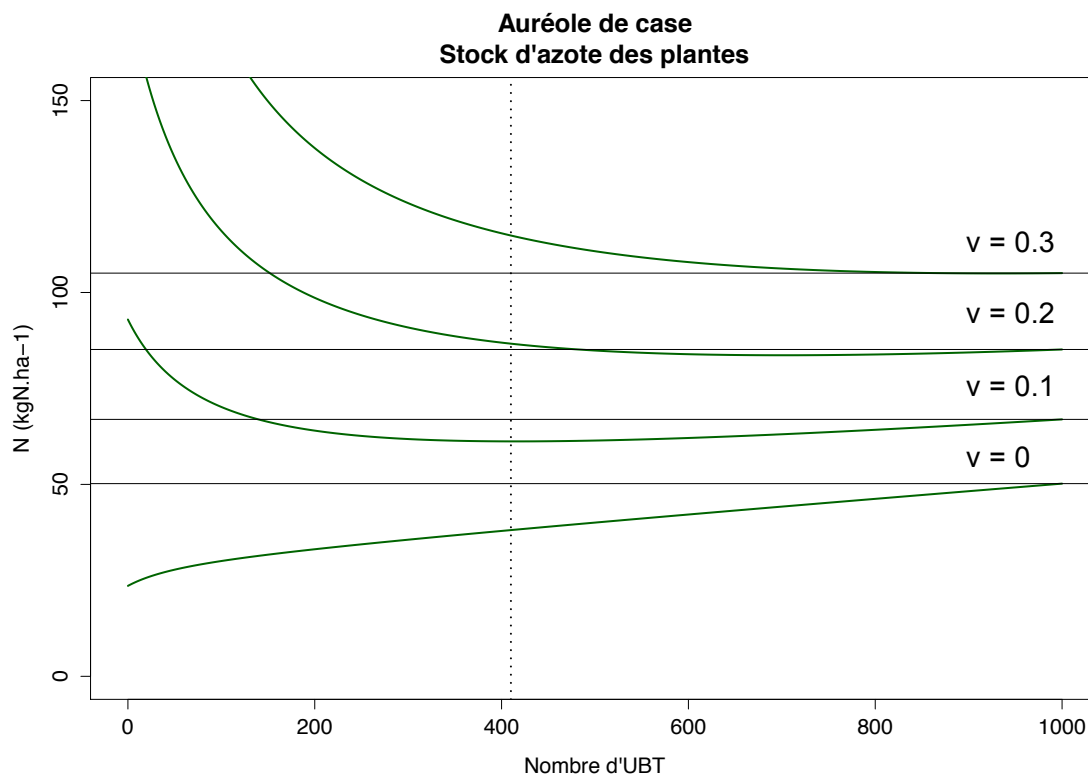


Figure 9 : Stock d'azote des plantes de l'auréole de case en fonction du nombre d'UBT lorsque le recyclage par le village est faible. Les lignes noires représentent le stock d'azote lorsque le nombre d'UBT est maximum. La ligne verticale pointillés indique le Nombre actuel d'UBT sur le terroir de Sare Yorobana en pointillés.

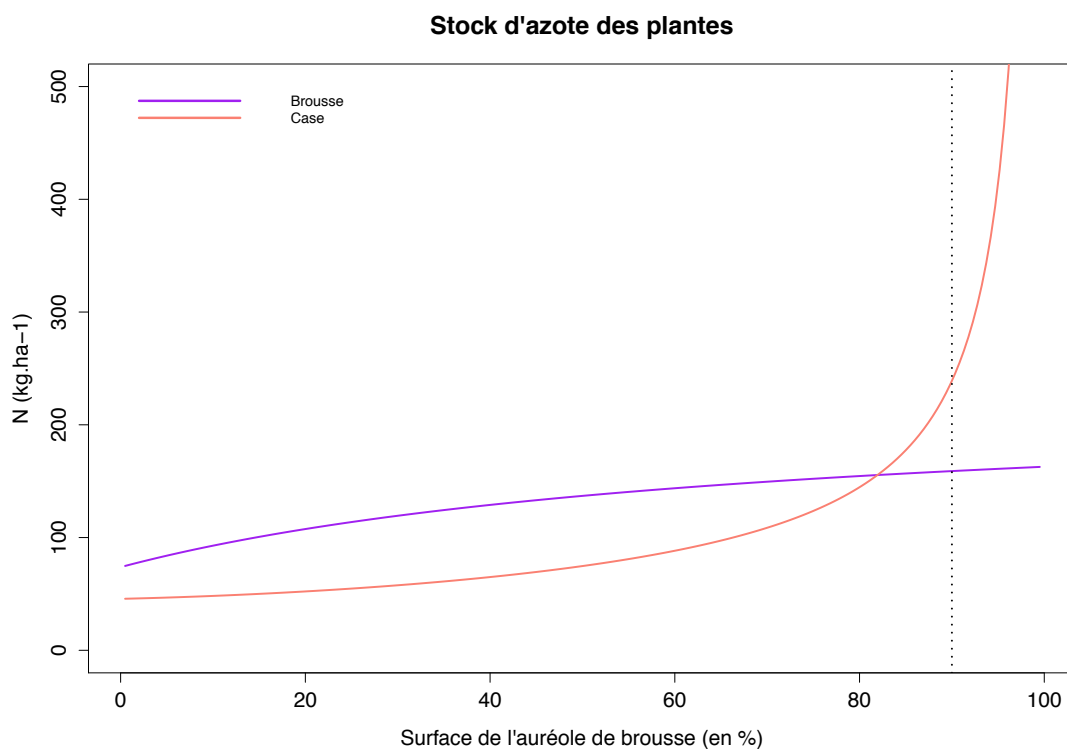


Figure 10 : Stock d'azote des plantes l'auréole de case et de brousse en fonction de la taille relative de l'auréole de brousse. Surface relative de l'auréole de brousse de Sare Yorobana en pointillés.

Choix d'une fertilisation azotée par des intrants minéraux ou par compléments alimentaires apportés aux herbivores

La fertilisation par l'ajout d'intrants azotés sur les cultures de l'auréole de case permet d'obtenir de meilleurs rendements sur l'auréole de case ainsi que sur la rizière, pour une expansion jusqu'à environ 85% de l'auréole de brousse (Figure 8c et d). L'auréole de brousse ne bénéficie pas de ce type de fertilisation (Figure 8b), et les rendements sont plus importants lorsque les bovins sont nourris aux compléments alimentaires. A partir d'une proportion de 85% d'auréole de brousse, comme c'est le cas à Sare Yorobana (traits en pointillés sur les figures), la rizière devient par conséquent plus productive lorsque les bovins sont nourris aux compléments alimentaires en bénéficiant du ruissellement depuis les champs de brousse (cf. Figure 4).

Dans ce cas de figure, il est intéressant de considérer non pas le flux de récolte total mais le flux de récolte de chaque auréole. Le riz est une culture vivrière assurant la sécurité alimentaire du village au même titre que le maïs et le mil. Nous pouvons alors discuter du compromis entre meilleurs rendements globaux et meilleurs rendements d'une zone de culture selon la demande en riz du village. Mais le choix de l'équilibre entre spéculations est également social : la rizière est cultivée par les femmes (Fanchette, 2005, Manlay *et al.*, 2004a) et l'augmentation de sa contribution à la production totale pourrait modifier le rapport de force entre genres.

Autres leviers d'action à l'échelle du terroir

La considération du terroir en tant que méta-écosystème permet de visualiser les leviers d'action qui favorisent une conservation plus importante de l'azote.

Le paramètre le plus influant du modèle est la fixation d'azote par les arachides (cf. Annexe 2). Ce paramètre peut être modifié en fonction de l'azote minéral disponible du sol. La part d'azote atmosphérique fixée par les arachides est estimée à 85% sans ajout d'intrants minéraux. Elle peut cependant diminuer à 41-62% lors d'une fertilisation jusqu'à 200 kg d'N.ha⁻¹ (Yoneyama *et al.*, 1990).

Les dépôts minéraux sont aussi un paramètre sensible du modèle. La plantation d'arbres est susceptible d'augmenter les dépôts particuliers notamment en azote, en modifiant la turbulence (Buerkert and Hiernaux, 1998). La conservation des zones arborées du terroir voire la reforestation de nouvelles parcelles pourrait donc avoir un effet sur ce paramètre.

Les taux de récoltes et la surface des auréoles sont des facteurs directs de l'estimation du flux de récolte global du terroir. Les paramètres sensibles pouvant être modifiés sont la surface relative des zones de culture ("*ab*" et "*ac*"), le taux de recyclage des déchets par le village ("*v*"), le nombre d'herbivores ("*cat*") ainsi que le recyclage de l'azote par leurs fèces ("*losscat*").

Le terroir de Sare Yorobana semble se situer actuellement dans une zone optimale de production pour les surfaces relatives des auréoles (Figure 7a, Figure 8d). Le recyclage par le village étant déjà élevé, une diminution des pertes d'azote est possible en diminuant le nombre d'herbivores ou en diminuant les pertes induites par les herbivores. Ces pertes sont limitées par exemple par une pratique de bâchage et d'enfouissement du fumier sur le terroir de Niakhar (Rufino *et al.*, 2006). Le recyclage de l'azote contenu dans les déjections humaines se heurte en revanche à un tabou culturel (Manlay *et al.*, 2004b).

Un autre paramètre sur lequel il est possible d'influer est le taux de sortie du stock de plantes de l'auréole de brousse "*P1*" ("*op1*") correspondant à l'exportation de la totalité des cultures

d'arachides. La conservation des fanes comme fourrage permettrait de garder une quantité d'azote plus importante dans le cycle du modèle.

Extensions possibles

Le manque de données à Sare Yorobana concernant la valeur des flux d'azote non anthropiques (ruissellement, lixiviation, décomposition...) a conduit à utiliser des données de l'écosystème de Lamto. Il serait intéressant d'effectuer une série de mesures de terrain afin de vérifier ces valeurs.

Au cours de mon stage, j'ai tenté de pallier à ce manque de données par une estimation des paramètres selon une calibration Bayésienne par les chaînes de Markov Monte-Carlo (MCMC). Les simulations ne présentaient pas de convergence. Dans le temps imparti de mon stage, je n'ai pas pu pousser plus avant cette calibration des paramètres. Mais le modèle serait plus robuste s'il bénéficiait d'une calibration de type Bayésienne selon d'autres méthodes non testées ici, du type modèles graphiques non orientés (Karkera, 2014).

Dans un soucis pratique, toutes les entrées et sorties ont été considérées comme réparties de façon homogènes depuis ou vers les stocks. En réalité les herbivores pâturent le long de parcours souvent identiques. Les résidus de récolte sont épandus sur une partie réduite des champs de case. Les taux de décomposition varient fortement au sein d'une même auréole (Manlay *et al.*, 2002a). Nous avons aussi cité l'impact des termites sur la disponibilité de l'azote du sol. Un modèle plus complet et plus complexe permettrait d'intégrer ces disparités spatiales à l'échelle intra-auréole.

Les conclusions tirées de ce modèle se basent sur l'étude du principal facteur limitant, l'azote. Mais les sols d'Afrique de l'Ouest sont aussi pauvres en phosphore, en potassium et en carbone (Pieri C., 1992). La productivité est limitée par le ratio C/N qui sera à prendre en compte dans le cas d'une poursuite de l'étude de ce terroir grâce à un modèle mathématique. Enfin, la prise en compte du stockage du carbone par cet écosystème est intéressant dans un contexte de changements climatiques. Elle permettrait de quantifier les émissions de gaz à effet de serre dus à l'élargissement des zones de culture (Fearnside, 2000).

V/ Conclusion

L'étude de la dynamique de l'azote sur ce terroir à l'aide d'un modèle a permis l'identification des pratiques permettant une conservation plus importante de ce nutriment dans le système. Nos résultats suggèrent que les changements de pratiques visant à intensifier la production végétale sur les terroirs Ouest Africains entraînent des pertes d'azote, par l'augmentation de l'importance des troupeaux et par la diminution de la surface relative de la brousse. La disparition progressive des jachères et des zones de culture extensives impacte le fonctionnement de l'agroécosystème car sa productivité et son fonctionnement sont dépendants de la diversité des utilisations des différentes auréoles (Manlay *et al.*, 2004a).

Notre modèle nous a permis d'identifier les leviers d'actions sur lesquels peuvent jouer les agro-éleveurs de Sare Yorobana pour diminuer les pertes d'azote du terroir. Mais l'application de nos conclusions nécessite une meilleure connaissance des contraintes sociales et économiques. L'agroécosystème de Sare Yorobana est un village constitué par un ensemble de concessions appartenant à des propriétaires différents. Sa gestion est donc à considérer selon le prix des intrants minéraux, le prix des compléments alimentaires, la



Pâtûre de branches d'accacia en saison sèche sur le terroir de Niakhar.

main d'œuvre et le matériel disponible, mais aussi selon la répartition des zones de cultures entre hommes et femmes ou les tabous culturels.

Le modèle est paramétré pour un terroir de Haute Casamance en raison de la description très complète de son fonctionnement. Le projet Cerao a défini sa zone d'étude dans le bassin arachidier, à Niakhar. Les données des flux de nutriments sont actuellement en cours d'obtention. Le climat est plus sec qu'en Haute Casamance. La zone de savane a disparu totalement, et les jachères sont réduites. Les agro-éleveurs pratiquent la vaine pâture comme à Sare Yorobana, mais aussi l'embouche bovine qui engendre des pertes d'azote lors du stockage et de l'épandage du fumier. Lorsque les paramètres décrivant le terroir de Niakhar auront été récoltés, et après quelques modifications suivant les différences d'utilisation des terres, le modèle sera applicable pour cette zone et permettra de visualiser là aussi les leviers d'intensification de la production végétale.

Remerciements

Merci tout d'abord à Jean-Luc Chotte et Dominique Masse pour m'avoir accueillie dans leurs équipes respectivement à Montpellier et à Dakar. Merci à mes tuteurs pour leur aide, leurs conseils et leurs relectures : Simon Boudsocq, Sébastien Barot et Tanguy Daufresne (pour m'avoir également fait apprécier le jus de Bissap glacé). Un grand merci à Raphaël Manlay pour sa présence, l'accès à son travail de thèse, ses précisions, ses corrections. Guerric Le Maire, Mamadou Bousso pour leurs connaissances en méthodes Bayésiennes, Jonathan Vayssières pour m'avoir fait participer au travail de terrain, Rémi Vézy pour son introduction à l'intelligence artificielle. Jërējëf aux chauffeurs de taxis et aux vendeurs de beignets de Dakar. Merci à toute l'équipe de l'UMR Eco&Sols et de l'IRD de Bel Air. Merci à mes proches, amis, collègues de France et d'ailleurs. Et enfin merci le Djam pour son excellente programmation (www.ledjamradio.com).

Bibliographie

Abbadie L. (2006), Nitrogen inputs to and outputs from the soil-plant system. In: Abbadie L., Gignoux J., Le Roux X., Lepage M., Lamto, structure, functioning and dynamics of a savanna ecosystem. *Ecological studies*, Vol. 179. Springer, New York, pp. 255-275.

Boudsocq S., Lata J. C., Mathieu J, Abbadie L. and Barot S. (2009), Modelling approach to analyse the effects of nitrification inhibition on primary production. *Functional Ecology*, **23**, 220-230.

Buerkert A. and Hiernaux P. (1998), Nutrients in the West African Sudano-Sahelian zone: losses, transfers and role of external inputs. *Zeitschrift Fur Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **161**(4), 365-383.

de Mazancourt C., Loreau M., Abbadie L. (1999), Grazing optimization and nutrient cycling: potential impact of large herbivores in a savanna system. *Ecological Applications*, **9**(3), 784-797.

Fanchette S. (2005), Patrimoines locaux et législations foncières à l'heure de la décentralisation en Haute-Casamance (Sénégal). In: Cormier-Salem M.-C., Juhé-Beaulaton D., Boutrais J., Roussel B. *Patrimoines naturels au Sud - Territoires, identités et stratégies locales*. IRD Editions, Paris, pp. 110-112.

Fearnside P. M. (2000), Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Clim. Change*, **46**, 115–158.

Jones J. A. (1990), Termites, soil fertility and carbon cycling in dry tropical Africa: a hypothesis. *Journal of Tropical Ecology*, **6**(3), 291-305.

Karkera K. R. (2014), Undirected graphical models. In: *Building probabilistic models with Python*. Packt Publishing Ltd, Birmingham, pp. 39-49.

Ker A. (1995), Africa - The changing continent. In: *Farming Systems in the African Savanna. A Continent in Crisis*. International Development Research Centre (IDRC), Ottawa, pp. 3-9.

Loreau M., Mouquet N. and Holt R. D. (2003), Meta-ecosystems: a theoretical framework for a spatial ecosystem ecology. *Ecology Letters*, **6**, 673–679.

Manlay R. J. (2000), Organic matter dynamics in mixed-farming systems of the West African Savanna - A village case study from south senegal. Doctoral thesis in Environmental Sciences, Montpellier: Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts.

Manlay R. J., Kairé M., Masse D., Chotte J-L., Ciorneia G., Floret C. (2002a), Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna - I. The plant component under semi-permanent cultivation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **88**, 215-232.

Manlay R. J., Masse D., Chotte J.-L., Feller C., Kaïré M., Fardoux J. and Pontanier R. (2002b), Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna - II. The soil component under semi-permanent cultivation. *Agriculture Ecosystems and Environment*, **88**(3), 233-248.

Manlay R. J., Ickowicz A., Masse D., Floret C., Richard D. and Feller C. (2004a), Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna - I. Element pools and structure of a mixed-farming system. *Agricultural Systems*, **79**(1), 55-81.

Manlay R. J., Ickowicz A., Masse D., Feller C. and Richard D. (2004b), 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**(1), 83-107.

Manlay R. J., Masse D., Chevallier T., Russell-Smith A., Friot D. and Feller C. (2004c), Post-fallow decomposition of woody roots in the West African savanna. *Plant and Soil*, **260**, 123–136.

McNaughton S. J. (1979), Grazing as an optimization process: grass-ungulate relationships in the Serengeti. *The American Naturalist*, **113**(5), 691-703.

Naseem A., Kelly V. (1999), Macro trends and determinants of fertilizer use in Sub-Saharan Africa. *MSU International Development Working Paper*, **73**. Michigan State University, Michigan.

Pieri C. (1992), *Fertility of soils: A future for farming in the West African Savannah*. Springer Series in Physical Environment. Springer-Verlag, Berlin, pp. 18-31 & pp. 296-302.

R Core Team (2014), R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rouland C., Lepage M., Chotte J. L., Diouf M., Ndiaye D., Ndiaye S., Seugé C. and Brauman A. (2003), Experimental manipulation of termites (Isoptera, Macrotermitinae) foraging patterns in a Sahelo-Sudanese savanna: effect of litter quality. *Insect. Soc.*, **50**, 309-316.

Rufino M. C., Rowe E. C., Delve R. J., Giller K. E. (2006), Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems. *Agriculture Ecosystems and Environment*, **112**, 261-282.

Soetaert K., Petzoldt T., Setzer R. W. (2010), Solving Differential Equations in R: Package deSolve. *Journal of Statistical Software*, **33**(9), 1-25.

UNDP (1999), Human Development Report. United Nations Development Programme, New York, 262 p.

Yoneyama T., Nambiar P. T. C., Lee K. K., Srinivasa Rao B., Williams J. H. (1990), Nitrogen accumulation in three legumes and two cereals with emphasis on estimation of N₂ fixation in the legumes by the natural ¹⁵N-abundance technique. *Biology and fertility of soils*, **9**(1), 25-30.

Annexe 1 : Equations du modèle

Auréole de brousse

N biomasse plantes

$$dP1/dt = (- res1 - op1 + ip1 + b1 * M1) * P1 - P1 * h1$$

N résidus de plantes

$$dR1/dt = res1 * P1 - c1 * R1 - (R1 * cat * H1)/ab$$

N organique

$$dD1/dt = - a1 * D1 - od1 * D1 + id1 + c1 * R1 - run1 * D1 + (R1 * cat * H1 * losscat * gb)/ab$$

N minéral

$$dM1/dt = - b1 * M1 * P1 - om1 * M1 + im1 + a1 * D1$$

Auréole de case

N biomasse plantes

$$dP2/dt = (- res2 - op2 + ip2 + b2 * M2) * P2 - P2 * h2$$

N résidus de plantes

$$dR2/dt = res2 * P2 - c2 * R2 - (R2 * cat * H2)/ac$$

N organique

$$dD2/dt = - a2 * D2 - od2 * D2 + id2 + c2 * R2 - run2 * D2 + (R2 * cat * H2 * losscat)/ac + ((R1 * cat * H1 * losscat * (1-gb)) + (R3 * cat * H3 * losscat * (1-gr)) + (cat * H0 * losscat * (1-gs)))/ac + v * (h1 * P1 * (ab/ac) + h2 * P2 + h3 * P3 * (ar/ac))$$

N minéral

$$dM2/dt = - b2 * M2 * P2 - om2 * M2 + im2 + a2 * D2$$

Rizière

N biomasse plantes

$$dP3/dt = (- res3 - op3 + ip3 + b3 * M3) * P3 - P3 * h3$$

N résidus de plantes

$$dR3/dt = res3 * P3 - c3 * R3 - (R3 * cat * H3)/ar$$

N organique

$$dD3/dt = - a3 * D3 - od3 * D3 + id3 + c3 * R3 + (R3 * cat * H3 * losscat * gr)/ar + run1 * D1 * (ab/ar) + run2 * D2 * (ac/ar)$$

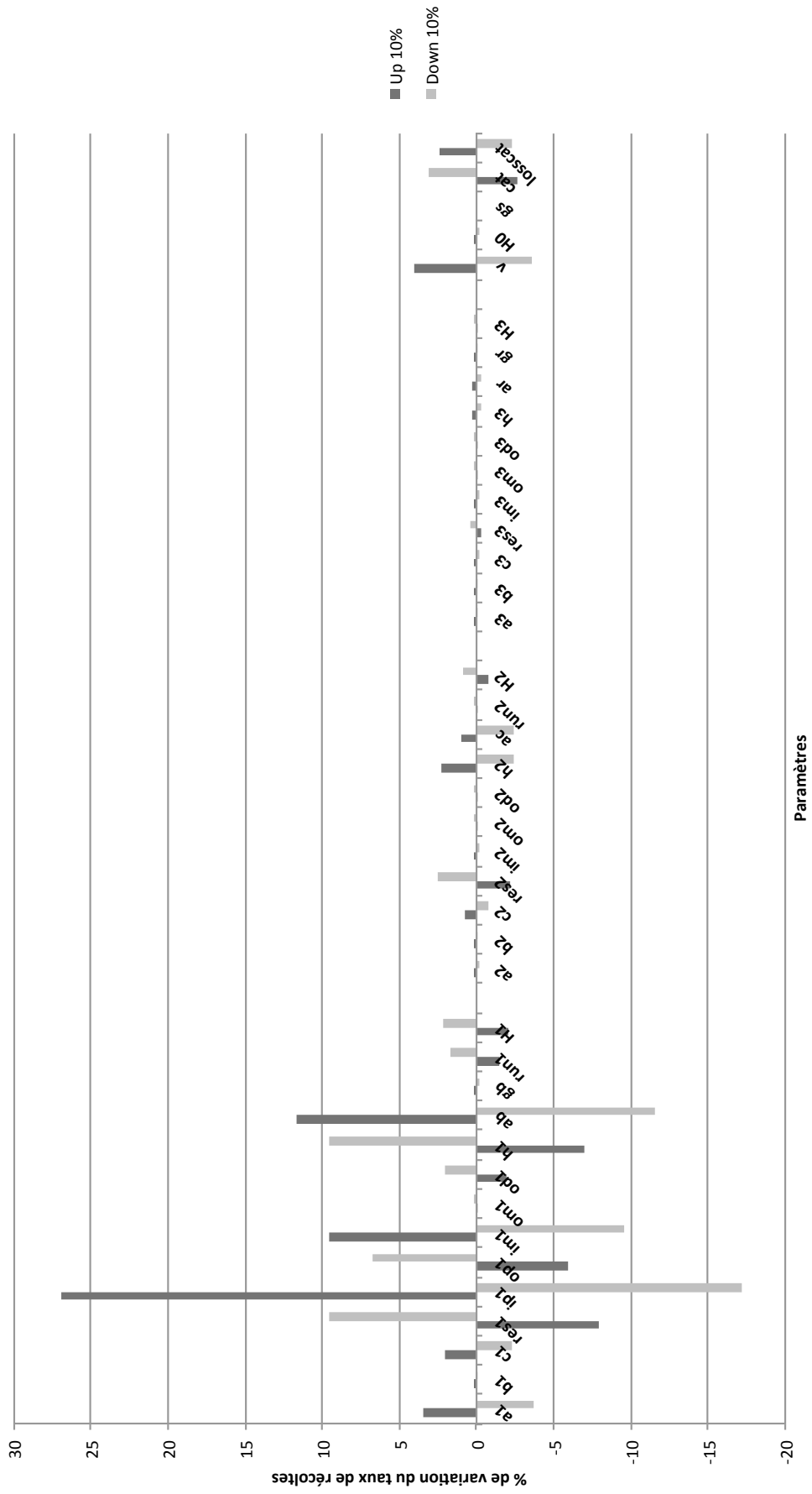
N minéral

$$dM3/dt = - b3 * M3 * P3 - om3 * M3 + im3 + a3 * D3$$

Paramètres

a	= minéralisation
b	= absorption par les plantes
c	= dégradation, mortalité
res	= part du stock plantes qui devient résidus (-récoltes)
ip	= entrées dans le stock plantes
op	= sorties dans le stock plantes
id	= entrées dans le stock N org
od	= sorties dans le stock N org
im	= entrées dans le stock N min
om	= sorties dans le stock N min
run	= ruissellement vers la rizière
h	= récoltes
H	= pression d'herbivorie
cat	= nombre d'herbivores
losscat	= efficacité de recyclage des herbivores
v	= recyclage par le village
ab	= taille de l'auréole de brousse
ac	= taille de l'auréole de case
ar	= taille de la rizière
gb	= temps passé par les herbivores sur l'auréole de brousse
gc	= temps passé par les herbivores sur l'auréole de case
gr	= temps passé par les herbivores dans la rizière
gs	= temps passé par les herbivores dans la savanne
1	= brousse
2	= case
3	= rizière

Analyse de sensibilité



Annexe 2 : Analyse de la sensibilité du modèle à la variation de 10% de chacun de ses paramètres.

Abstract

The recent population growth in West African Savannas leads to change of land use practices in traditional mixed-farming systems. The two main modifications are the extension of cropped land areas over fallows, and bigger cattle herd sizes. To evaluate the role of these changes on land fertility, we developed a N cycling model applied to a traditional agrosystem in southern Senegal (High Casamance). We simulated primary production values through the N stocks and flows calibration. Our model shows that fallows reduction threatens cropped lands fertility. Cattle play a major role in N transfers among the system, but are responsible for massive losses through urine evaporation and dung leaching. They can contribute nevertheless to food crops fertility, together with a high household wastes recycling rate from the village. We would be able to calibrate our model for other West African agrosystems with similar evolution trends in land use practices.

Key words :

Metaecosystems, N transfer, West African Savanna, mixed farming system, agricultural practices

Résumé

La récente croissance démographique en Afrique de l'Ouest conduit à des changements de pratiques agricoles dans les systèmes de cultures et d'élevage traditionnels. Ces changements sont principalement l'extension des zones cultivées au dépend des jachères et l'augmentation de la taille des troupeaux. Afin d'évaluer le rôle de ces changements sur la fertilité des terres, nous avons développé un modèle du cycle de l'azote appliqué à un agrosystème traditionnel du sud du Sénégal (Haute Casamance). Nous avons simulé les valeurs de production primaire par la calibration des stocks et flux d'azote. Selon notre modèle la réduction des jachères menace la fertilité des terres cultivées. Le bétail joue un rôle majeur de transfert d'azote dans le système, mais il est responsable d'importantes pertes par la volatilisation des urines et le lessivage des fèces. Il contribue cependant à la fertilité des cultures vivrières, au même titre que le taux élevé de recyclage des déchets ménagers par le village. Notre modèle peut être calibré pour d'autres agrosystèmes d'Afrique de l'Ouest présentant les mêmes tendances d'évolutions des pratiques agricoles.

Key words :

Métaécosystèmes, transferts d'azote, savanes ouest-africaines, système agricole mixte, pratiques agricoles