

Sommaire

• Remerciements	1
• Liste des principales abréviations	3
• Liste des figures	4
• Liste des tableaux	8
• Introduction Générale	11
<i>Etude du Fonctionnement, de la Durabilité et des Impacts Environnementaux des Systèmes de Production Extensifs en Zone Agropastorale Tropicale</i>	
1. CONTEXTE DE L'ETUDE	12
1.1. Introduction.....	12
1.1.1. Caractérisation des systèmes de production pastoraux et agropastoraux	
1.1.2. Problématiques et enjeux liés à aux espaces pastoraux et agropastoraux	
1.2. Les différentes approches adoptées pour traduire les interrelations entre élevage et ressources alimentaires.....	15
1.2.1. Approche socio-économique	
1.2.2. Approche agronomique intégrée	
1.2.3. Approche zootechnique	
1.2.4. Approche éthologique des ruminants sur parcours	
1.2.5. L'avenir des systèmes agropastoraux tropicaux	
2. ETAT DES CONNAISSANCES ET OPTIONS POUR L'EVALUATION DES SYSTEMES AGROPASTORAUX	17
2.1. La formalisation du fonctionnement des systèmes agropastoraux permet d'envisager leur représentation.....	17
2.2. L'intégration de la mobilité des animaux est indispensable à la représentation du système agropastoral	18
2.3. Les formalismes de représentation des circuits de ruminants sur parcours.....	18
2.4. Les principes de notre démarche de modélisation.....	19
3. LE PROJET DE RECHERCHE ET LA METHODE D'ETUDE	19
3.1. L'hypothèse de recherche et nos objectifs.....	19
3.2. Les ambitions et les limites de cette thèse.....	21
3.3. Présentation des terrains d'étude en Afrique sub-saharienne.....	21
3.3.1. La zone sahélo-soudanienne sub-aride agropastorale de Kolda	
3.3.2. La zone sahélienne semi-aride pastorale de Dahra	

4. PLAN DU MANUSCRIT.....	22
----------------------------------	-----------

• Chapitre 1 -----	23
<i>Etude de l'Ingestion Alimentaire des Bovins en Libre Pâturage sur Territoires Semi-arides Tropicaux à partir de Mesures Instantanées et Journalières</i>	

Introduction : Situer et quantifier les prélèvements des bovins en libre pâturage sur parcours tropical

1. CARACTERISER LES UNITES DE VEGETATION DE LA ZONE DE LIBRE PATURE.....	25
2. DETERMINER LES COUVERTS CONSOMMES ET LES VITESSES D'INGESTION.	26
2.1. Définition des couverts et méthode d'estimation des vitesses d'ingestion instantanées.....	26
2.2. Facteurs liés aux couverts et aux animaux devant influencer sur les vitesses d'ingestion.....	27
3. LIER LES PROCESSUS D'INGESTION INSTANTANES AUX QUANTITES INGEREES QUOTIDIENNES.....	27

Article : Feed Intake of Free Ranging Cattle on a Tropical Semi-arid Territories through Instantaneous and Daily Measurements

Abstract.....	29
Resumen.....	30
INTRODUCTION.....	31
1. MATERIALS AND METHODS.....	31
1.1. Studied area, south of Senegal.....	31
1.2. Estimations of daily intake rates from faeces quantities.....	33
1.2.1. Arithmetical relation between daily intake rates and faeces quantities	
1.2.2. Estimation of daily intake rates through the spectral analysis of faeces	
1.3. Estimation of instantaneous intake rates on rangeland.....	34
1.3.1. Adjusting instantaneous intake rates on available biomasses with a biological model	
1.3.2. Observation method	
1.3.3. Relation between instantaneous intake rates and the other measured factors	
1.4. Relation between instantaneous and daily intake rates.....	36
1.5. Evaluation of the agropastoral territory methods in a sahelian pastoral rangeland context.....	36
2. RESULTS.....	37
2.1. Estimations of daily intake rates from faeces collected in the agropastoral Kolda region.....	37
2.1.1. Analysis of daily intake rates estimated from faeces quantities (DIRfq) and diet digestibility	
2.1.2. Estimations of daily intake rates from NIRS	

2.2. Analysis of instantaneous intake rates related to available biomass in the agropastoral territory.....	39
2.2.1. Vegetation covers description	
2.2.2. Adjustment of instantaneous intake rates with Michaelis-Menten models	
2.2.3. Share of instantaneous intake rates' variability explanation between the measured variables	
2.3. Relation between daily and instantaneous intake rates.....	42
2.4. Application of the methods to data from a sahelian pastoral rangeland.....	43
2.4.1. Instantaneous intake rates results in the pastoral area	
2.4.2. Daily intake rates results in the pastoral area	
2.4.3. Using seasonal and steady vs non steady circuits'bouts (equation [4]) to determine daily intake rates in the pastoral area	
3. DISCUSSION AND MANAGEMENT IMPLICATIONS.....	44
3.1. Analysis of daily intake rates as a results from night park faeces collections.....	45
3.1.1. Analysis of daily intake rates results regarding the NIRS estimations	
3.1.2. Analysis of daily intake rates results regarding published data	
3.1.3. Effectiveness of factors affecting daily intake rates	
3.2. Estimation and prediction of instantaneous intake rates in dry tropical areas.....	47
3.2.1. Average estimation of instantaneous intake rates	
3.2.2. Source of variability of instantaneous intake rates	
3.3. Relation between instantaneous intake rates and daily intake rates.....	49
CONCLUSION.....	50
LITERATURE CITED.....	51

Conclusion partielle

1. VALEURS ET FACTEURS DE VARIABILITE DES VITESSES D'INGESTION INSTANTANEEES.....	54
2. FACTEURS DE VARIATION DES QUANTITES INGEREES QUOTIDIENNES ET LIEN AVEC LES VITESSES D'INGESTION INSTANTANEEES.....	55
2.1. Variabilité des quantités ingérées quotidiennes.....	55
2.2. Utilité de l'observation des vitesses d'ingestion instantanées pour la prédiction des niveaux d'ingestion quotidiens.....	56

• Chapitre 2 -----	59
<i>Modéliser le Comportement Spatial de Troupeaux Bovins en Libre Pâturage au Sahel : Description des Circuits Quotidiens, Conceptualisation et Validations</i>	

Introduction : Eléments structurant des circuits quotidiens des troupeaux bovins sur parcours tropicaux en zones sèches

1. DESCRIPTION DES VARIABLES D'ETAT DES CIRCUITS JOURNALIERS.....	61
2. ANALYSES DES VARIABLES INTRA-CIRCUITS.....	61

Article : Modeling Free-Ranging Cattle Spatial Behavior in Sahel: Daily Circuits Description, Conceptualization and Validations

Abstract.....	62
Resumen.....	63
INTRODUCTION.....	63
1. METHODS.....	64
1.1. Study area.....	64
1.2. Local climatic conditions.....	65
1.3. Data collection.....	65
1.3.1. General Organization	
1.3.2. Daily organization of measures	
1.3.3. Data processing	
1.3.4. Modeling free-ranging cattle agents	
2. RESULTS.....	68
2.1. Durations, starting and ending times of daily circuits.....	68
2.2. Daily walked distances.....	70
2.3. Cattle activities on rangeland.....	71
2.4. Interest of the concept of Residence Times (RT).....	72
2.5. Modeling herds' movements with a driving function (DF).....	74
3. DISCUSSION AND MANAGEMENT IMPLICATIONS.....	76
3.1. Reasoning the setting parameters in a free-ranging cattle model during the dry season.....	76
3.1.1. Circuits durations	
3.1.2. Walked distances	
3.1.3. Activities on rangeland	
3.1.4. From circuits description to circuits conceptualization	
3.2. What is the interest of our free-ranging cattle model?.....	78
CONCLUSION.....	78
LITERATURE CITED.....	79

Conclusion partielle

1. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES DESCRIPTEURS DES CIRCUITS DES TROUPEAUX DE N'DAMA SUR PARCOURS AGROPASTORAL SAHELO-SOUDANIEN.....	82
1.1. Temps de parcours journaliers.....	82
1.2. Distances parcourues quotidiennement.....	82
1.3. Activités des bovins sur parcours et temps de résidence.....	83
2. REPRESENTATION ET ANALYSE DU SYSTEME DIVAGUANT PAR UN MODELE MULTI-AGENT SIMPLIFIE.....	84

2.1. Théories du comportement spatial et alimentaire des ruminants.....	84
2.2. Rappels sur la première étape de modélisation.....	85
2.3. Perspectives d'amélioration et de complexification.....	86

• **Chapitre 3 ----- 89**

Modélisation intégrée des comportements spatiaux et alimentaires de bovins en libre parcours pour raisonner la gestion durable d'un écosystème agropastoral tropical

Introduction : Représentation du comportement spatial et alimentaire dans le modèle PastoTrop

Corps de chapitre : Modélisation intégrée des comportements spatiaux et alimentaires de bovins en libre parcours pour raisonner la gestion durable d'un écosystème agropastoral tropical

Résumé.....	93
Abstract.....	94
INTRODUCTION.....	94
1. MATERIEL ET METHODES.....	95
1.1.Choix d'un formalisme adapté à la représentation des interactions entre troupeaux et parcours.	95
1.1.1. Intérêt des systèmes multi-agents	
1.1.2. Les spécificités de la zone d'étude agropastorale tropicale	
1.1.3. Données d'observations du comportement spatial et alimentaire des troupeaux	
1.1.4. Elaboration d'un modèle conceptuel du système complexe représenté	
1.2.Phase exploratoire sur la mobilité des troupeaux.....	100
1.2.1. Intégration d'éléments théoriques et mesurés	
1.2.2. Paramétrage des règles de choix des agents, intégrant des facteurs non liés à la ressource	
1.3.Intégration de facteurs liés à la ressource dans les règles de choix des agents et des processus d'ingestion.....	103
1.3.1. Description de la deuxième version de PastoTrop	
1.3.2. Méthode d'analyse des simulations	
1.3.3. Evaluation des compromis robustes de combinaisons de facteurs et intégration d'un processus d'ingestion	
2. RESULTATS.....	108
2.1. Recherche d'une hiérarchie entre les facteurs et d'un compromis robuste pour les agents.....	109
2.1.1 Recherche de hiérarchie entre les facteurs par l'application d'une méthode statistique analytique	
2.1.2. Evaluation de la pertinence de recherche d'un compromis de combinaisons de facteurs par l'application d'une méthode statistique descriptive	
2.1.3. Détermination probabiliste de combinaisons et tests de validité	
2.1.4. Allègement partiel de la procédure de validation	
2.2. Analyse spatiale des circuits simulés.....	118
2.2.1. Analyse des circuits par la méthode des temps de résidence	
2.2.2. Comparaison des séquences d'unités de végétation visitées entre observations et simulations	

2.3. Prédiction de l'ingestion et des régimes journaliers des bovins à partir des différentes méthodes d'implémentation de l'ingestion.....	120
---	-----

3. DISCUSSION..... 122

3.1. Discussion du calibrage d'un modèle de système d'élevage divaguant en zone sèche..... 122

3.1.1. Introduction : une démarche exploratoire sur l'importance relative des facteurs	
3.1.2. Justification des méthodes de calibrage des processus et d'analyse des résultats de simulation multi-agents	

3.2. Etude des règles de choix des agents..... 124

3.2.1. Difficultés dans la recherche d'une règle de décision robuste par agent	
3.2.2. Recherche d'une règle de décision robuste par agent	
3.2.3. Analyse de la stabilité des sorties du modèle par le biais de la procédure de validation	
3.2.4. Conclusion sur la recherche d'un compromis	

3.3. Maîtrise des processus d'ingestion..... 127

CONCLUSION..... 128

BIBLIOGRAPHIE..... 129

• Discussion générale – Conclusions ----- 133

Représenter de façon intégrative le comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours agropastoral tropical

1. CONTEXTE DE LA RECHERCHE..... 135

2. INTEGRATION DU COMPORTEMENT SPATIAL ET ALIMENTAIRE..... 136

2.1. Intégration des processus d'ingestion : enjeux de réalisme et de portabilité du modèle..... 136

2.2. Intégration des pratiques, de la polarisation des aménagements et des théories déterministes de comportement des individus..... 139

2.3. Intégration des processus d'ingestion et des facteurs d'orientations des troupeaux dans un modèle spatialisé orienté agents..... 140

2.3.1. Positionner notre démarche entre réalisme, abstraction et portabilité	
2.3.2. Reconstruire le comportement spatial et alimentaire : validation des hypothèses	

3. PERSPECTIVES DE COMPLEXIFICATIONS ET BILAN SUR LA COLLECTE DES MESURES DE TERRAIN POUR PREDIRE LES PERFORMANCES ANIMALES A PARTIR DES CIRCUITS SIMULES..... 143

3.1. Deux contraintes majeures au réalisme à ce stade de l'étude..... 143

3.2. Passage d'une approche troupeau-centrée à une approche vache-centrée..... 144

3.3. Conclusions générales et perspectives..... 145

• Eléments bibliographiques ----- 147

• Annexes	157
Annexe 1 : Curriculum Vitae	159
Annexe 2 : Publications (<i>liste</i>)	161
Annexe 3 : Zones de parcours étudiées	163
Annexe 4 : Base de données ABT	167
Annexe 5 : Protocole de suivis des troupeaux tropicaux (2008-2009)	169
Annexe 6 : Communication 3R (2008)	179
Annexe 7 : Variables de sorties de simulations du modèle PastoTrop (version 2.1)	183

Rapport-Gratuit.com

Bilan de cette expérience professionnelle - Remerciements

Après l'acquisition d'une culture d'ingénieur agronome, je me suis confronté à une nouvelle culture de travail. J'ai aimé ce travail et ces activités : (1) Au cours de mon cursus (cf. Annexe 1), je n'avais pas pu faire d'enseignement. Le temps de la thèse me l'a permis, à l'université, sur une discipline en marge de mon travail quotidien, et à Montpellier SupAgro. Cette expérience m'a apporté sur le plan pédagogique. (2) J'ai conduit des travaux de terrain : cela a amélioré mes capacités d'adaptation à l'équipe locale, et mon aptitude à prendre des initiatives. J'ai eu à monter un laboratoire, gérer un technicien, puis organiser une équipe sur le terrain pour m'appuyer lors des suivis. (3) J'ai co-encadré deux stagiaires de M2, ce qui m'a apporté un point de vue sur la gestion des ressources humaines. (4) Je me suis immergé dans de nouveaux outils : statistiques, logiciel R, programmation objet sous Cormas. Car si j'ai collaboré avec une équipe compétente, c'est bien moi qui ai conduit toutes les descriptions, analyses et représentations du système étudié. (5) J'ai enfin tenté de valoriser mes travaux au mieux (cf. Annexe 2).

Une thèse n'est pas une continuité d'un cursus universitaire. C'est une première expérience professionnelle. C'est une aventure pour avancer dans son projet professionnel. J'ai tenté de développer mes compétences de synthèse, de logique, avec des outils méthodologiques pour mener à bien ce projet. Cela n'aurait bien entendu pas été possible sans que je définisse et entretienne un réseau de compétences variées. Au terme de cette thèse, je pense être devenu opérationnel, restant toutefois conscient d'avoir encore un manque de « background ».

Je tiens donc à remercier tous ceux qui ont permis cet aboutissement. Je commence par mon équipe d'encadrement, sans laquelle il n'y aurait rien eu du tout : F. Bocquier (Montpellier SupAgro) et A. Ickowicz (CIRAD), puis par S. Messad, statisticien, et B. Bonté, doctorant, modélisateur (CIRAD). J'ai eu la chance d'avoir dans mon environnement proche les compétences des modélisateurs F. Bousquet et J.-P. Müller (CIRAD) et d'un éthologue qui a largement évolué dans les sphères de la modélisation objet, B. Dumont (INRA).

Je remercie ensuite ceux qui ont su m'apporter des éléments de méthode ou des considérations plus en marge. De L'INRA : C. Agreil pour son avis sur la vision « classique » du ruminant au pâturage, P. Hassoun pour nos échanges, J. Teyssier pour ses connaissances en statistiques, C. Trives pour sa contribution aux broyages d'échantillons de fèces et de végétation, Marc Benoît pour l'initiation à l'agronomie des paysages, M.-O. Nozières pour des relectures, Amandine Lurette pour nos échanges. Du CIRAD : E. Tillard pour ses connaissances en statistiques, P. Lecomte et D. Bastianelli et L. Bonnal pour leur aide sur les analyses proche infrarouge d'échantillons de végétation et de fèces, D. Richard et X. Juanez pour nos échanges, et V. Ancey pour nos échanges sur la recherche finalisée mais aussi pour son hospitalité à Dakar. De Montpellier SupAgro : M. Jouven pour nos échanges, P. Lapeyronie pour nos discussions sur le comportement spatial des ruminants, et C. Aubron pour ses relectures et ses compétences en Espagnol. D'autres instituts : C. Manoli (INRA – CIRAD) pour des relectures, L. Puillet (INRA – Agro ParisTech) pour nos échanges sur le doctorat et les sciences animales, G. Charbonnier (UCEAR) pour son partage d'expérience sur l'amélioration génétique des N'Dama au Sénégal, P. Ezanno (ENV Nantes) pour ses explicitations sur ses travaux de thèse, S. Benhamou (CEFE-CNRS) pour sa disponibilité et son appui pour l'analyse spatiale des circuits des troupeaux, E. Perrier (IRD) pour sa réponse rapide quant à une question sur les dimensions fractales, et C. Perrier (Lycée du Parc, Lyon) pour son appui à la préparation des TP de biologie végétale.

Je tiens à remercier chaleureusement l'équipe du Sénégal, à Kolda en particulier : D. Babène, technicien ISRA, A. Diamanka, mon « pisteur de vaches », O. Diao et A. Baldé, propriétaires des troupeaux et collaborateurs, K. Cissé, pour son appui logistique au village de Saré Yoro Bana et M. Gassama, pour son appui logistique à Kolda.

Je remercie également ceux qui ont évalué mon travail afin de juger mes aptitudes à mener des recherches en tant que Docteur. Merci donc à E. Perrier (IRD), M. Meuret (INRA), R. Baumont (INRA), J. Wéry (Montpellier SupAgro), ainsi qu'aux membres de mon équipe : F. Bocquier (Montpellier SupAgro), A. Ickowicz (CIRAD) et F. Bousquet (CIRAD).

Je n'oublie pas enfin celles et ceux en marge de ce projet, avec qui j'ai eu ou j'ai encore plaisir à vivre et à partager un peu du quotidien.

Guillaume



(A. Diamanka, A. Diao, A. Baldé, K. Cissé)

Liste des principales abréviations

Organisations et Instituts : -----

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

FAO : Food and Agriculture Organization

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

Elements méthodologiques et statistiques : -----

ACP : Analyse en Composantes Principales

AIC : Akake Information Criterion

ANOVA : Analysis Of Variance

CORMAS : COMmon-pool Resources and Multi-Agents Systems

IIRmax / VImax : maximal Instantaneous Intake Rates / Vitesse d'Ingestion instantanées maximale, *en g MS/min*

K : Paramètre d'un modèle Michaëlis-Menten pour lequel $VI = VImax / 2$, *en kg MS/ha*

R.S.E. : Residual Standard Error

RT : Residence Time (method), *en min*

SMA : (systèmes par) Simulations Multi-Agents

S.D. / E.-T. : Standard Deviation / Ecart-Type

S.E. / E.S. : Standard Error / Erreur Standard

UML : Unified Modeling Language

Eléments des systèmes d'élevage agropastoraux étudiés : -----

BCS / NEC : Body Condition Score / Note d'Etat Corporel

Bm : Biomass / Biomasse, *en kg MS/ha*

DIR / QI : Daily Intake Rates / Quantités Ingérées quotidiennes, *en kg MS/j*

DM / MS : Dry Matter / Matière Sèche

EDS / DSS : Early Dry Season / Début de Saison Sèche

IIR / VI : Instantaneous Intake Rates / Vitesses d'Ingestion instantanées, *en g MS/min*

LDS / FSS : Late Dry Season / Fin de Saison Sèche

LW / PV : Live Weight / Poids Vif, *en kg*

MDS / MSS : Mid Dry Season / Milieu de Saison Sèche

RS / SP : Rainy Season / Saison des Pluies

UBT : Unité Bétail Tropical

Liste des figures

Introduction Générale -----

Figure 1. Localisation des régions de Dahra et Kolda sur la carte du Sénégal, et zonage agro-écologique normatif (d'après Guiro 2005). p. 22

Chapitre 1-----

- *Introduction*

Figure 1. Toposéquence morphopédologique du terroir villageois de Saré Yoro Bana, sud du Sénégal. Ce profil est la maille type des paysages de Haute-Casamance (d'après Ickowicz et Mbaye, 2001). p. 25

Figure 2. Séquences de végétation exploitées quotidiennement par des bovins N'Dama sur le territoire villageois de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal), au cours d'une saison sèche. Les circuits sont segmentés par taille des troupeaux et par période de saison sèche ($n = 10$ par catégorie). Les paliers sont les temps moyens de fréquentation. La rizière, à partir de l'ouverture des premières parcelles rizicoles totalement récoltées, a de plus en plus d'importance dans la journée de libre pâture des bovins, jusqu'en début de la période nommée fin de saison sèche. p. 26

- *Article*

Figure 1. Senegal map. Dakar is the capital city. Kolda is located in the sub-arid part, south of the 800 mm-rainfall limit. Dahra is in the semi-arid part, between the 200 and the 400 mm isohyetes. p. 32

Figure 2. Variations of the Michaelis-Menten models parameters K and IIRmax (Instantaneous intake rates max). Segments are the parameters' confidence intervals. IIRmax is the asymptotic instantaneous intake rate (IIR, g DM/min) and K has a biomass (kg DM/ha) dimension. Parameters correspond to one cover type for which it was possible to adjust such a non-linear model. The standard error (SE) of the parameters and the residual standard errors (RSE) of the models are given. Parameters' significance (t -test) are also indicated (***: $P < 0.001$, **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$, else: *ns*). p. 40

Figure 3. Examples of Michaelis-Menten models (bold curves) adjusting plots of instantaneous intake rates (IIR) as a function of the available biomass (Bm), recorded on the rice field (a) and on maize, millet and sorghum fields (b). Seasons of the observations are indicated for each point: early (EDS), mid (MDS) and late dry season (LDS). For each models, parameters K and IIRmax are written, besides the residual standard error (RSE). The curves bordering the model adjustment are the limits of the confidence interval of the mean curve. The dashed line smoothes the plot, through a method of local polynomial regression fitting, using the least squares. p. 41

Figure 4. Michaelis-Menten model (bold curve) adjusting the plot of instantaneous intake rates (IIR) as function of available biomass (Bm), calculated on various straws in the pastoral area of North Senegal (4.a), during mid- (MDS) and late dry season (LDS), and in the agropastoral area of South Senegal (4.b), during the whole dry season including early dry season (EDS) then MDS and LDS. The curves bordering the model adjustment are the confidence interval of the mean curve. The dashed line smoothes the plot, through a method of local polynomial regression fitting, using the least squares). p. 43

- *Conclusion partielle*

Figure 1. Evolution schématique des vitesses d'ingestion instantanées (g MS/min) au cours de la saison sèche, dans le cas des pailles de riz, sur le territoire agropastoral tropical de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal). Un maximum est observé en milieu de saison sèche. L'interprétation de l'évolution des vitesses d'ingestion est que l'augmentation des vitesses est liée à l'amélioration de la préhensibilité (liée au piétinement) jusqu'à un niveau de déplétion de la ressource qui entraîne la chute des vitesses d'ingestion. Comme l'évolution de la préhensibilité n'a pas été quantifiée, l'intersection des courbes d'évolutions des biomasses et de la préhensibilité a été fixée aléatoirement. p. 54

Figure 2. Evolution des notes d'état corporel (NEC) de bovins N'Dama sur le territoire villageois agropastoral tropical de Saré Yoro Bana au cours des saisons sèches. Les troupeaux ont été distingués selon l'effectif du

cheptel (petit, i.e. < 70 têtes et grand, i.e. > 70 têtes). L'encadré correspond à la fin de saison sèche. C'est entre mai et juin que l'état corporel moyen des animaux est le plus mauvais, en accord avec les quantités ingérées quotidiennes, au plus bas de l'année (** : $P < 0.0045$, correction de Bonferroni). p. 56

Chapitre 2-----

- *Article*

Figure 1. Predicted values (curve) and observed values of daily circuits durations as a function of calendar days ($n = 227$, $R^2 = 0.84$). The amplitude during the dry season (DS), divided in early (EDS), mid (MDS) and late dry season (LDS) is high, about four hours, before the rainy season (RS). We noted that our year segmentation is relevant: extrema of durations occur at the EDS and the LDS and transitions at the MDS and the RS. As the annual model was obtained by the superimposition of all observations undertaken during 3 years, the discontinuity of curves corresponds to the predicted values initialization. p. 69

Figure 2. Daily walked distances distribution according to herd size (small, 20 mature cows vs. large, more than 60), season (early dry -: EDS, mid dry -: MDS, late dry -: LDS, which compose the dry season: DS, and rainy season: RS), along three years of observation. For RS, herders drive cattle on long distances, mainly through forest, far away from crop fields: there is a significant difference between DS and RS (t -test, corrected by the Bonferroni P -value method). In LDS, circuits tend to get longer, mainly because of scarcity of resource. That is statistically stressed for the small herd. p. 70

Figure 3. Evolution of activities on rangeland, compared to the daily durations dynamic along the year. Data are fitted by a 4th order regression polynomial model. Based on averages comparisons (t -test), walking activity is quite constant during the dry season (a). On the contrary, grazing while walking and resting activities follow the daily durations trend (a, b, c significantly different $P < 0.01$). Especially, during the lengthening of daily durations, resting bouts are increasingly long. Differences are significant (A, B) between dry and rainy season ($P < 0.01$). p. 71

Figure 4. PCA results on the residence time values for each minute of every single circuits, projected on the factorial plan, built with the two first principal components. Plotted points are daily circuits ($n = 116$). PCA is a way to show synthetically, variability of circuits. Ellipses centers are averages of RT for each minute of circuits, determined as belonging to a same group. Those are represented according to season (early dry-: EDS, mid dry-: MDS, late dry-: LDS and rainy season: RS, 4.a) and herd-size (4.b). In order to distinguish circuits variability but clustering too, per season or per herd-size, each plotted point (i.e. circuit) is linked by a segment to the center of associated group (i.e. at the average of the points variability). Confidence ellipses encompass 99% of circuits for a given group. p. 72

Figure 5. Average curves of daily circuits RT. The four seasons previously defined (5.a- early dry, 5.b- mid dry, 5.c- late dry, and 5.d- rainy) are represented. Total no. of circuits and no. of circuits used for the RT average per season are notified. Hatched areas begin when cattle are tied up at the night park (RT is zero in hatched areas). p. 73

Figure 6. Caption of the pixelized map of the village territory used as environment for three free-ranging cattle agents. Circuits illustrated for agent 1 (small herd-like: "small") and agent 2 (large herd-like: "large") result from the combination of 3 abiotic factors of orientation choice. p. 75

Figure 7. barplot-like graphs of time-based outputs, emergeant of 14 sets of simulations. Segments linking points facilitate the reading: but the x-axis is not numerical and continuous but represents basically a decreasing value of factors 1 and 2, while factor 3 remains constant. Factor 1 is a "walk ahead" command. Factor 2 is a "closest distance" command. Factor 3 is the distance from a vegetation unit to the next facility, including an internal weight, so called "drive function". Each point is the average value of results of five simulations. Points in the same column, on 7.a and 7.b, correspond to the same set of those five simulations. In a set, the two represented agents run orientation decisions according to a given combination of three abiotic factors (bottom of 7.b in column). Time values for watering time (7.a) and stop time (7.b) are compared to the real values observed on the field (dotted area). p. 75

Chapitre 3-----

- *Introduction*

Figure 1. Diagramme de classes du modèle conceptuel du modèle PastoTrop, simulant le comportement spatial et alimentaire de bovins tropicaux sur parcours, en zones sèches. Les entités représentées sont encapsulées dans des classes, conformément à l'approche objet. Quatre « paquets » d'entités se distinguent : le parcours (en vert), les animaux (en rouge), l'agro-éleveur (en noir) et les structures utiles au calibrage et à l'analyse du modèle (en bleu). Le parcours est une construction de l'environnement des animaux, à partir d'entités de végétation et d'aménagements, abiotiques. L'agro-éleveur détermine quels aménagements sont utilisés et oriente son troupeau à l'heure de départ. Le troupeau, qui connaît son éleveur, est une agrégation d'individus, qui ne sont pas nécessairement les bovins. L'individu peut, selon l'étape de travail, être différents niveaux de groupes de bovins (d'où le concept d'agent agrégé), depuis le troupeau en entier jusqu'au bovin. Ces agents peuvent être leaders ou suiveurs. Les suiveurs sont inféodés au leader. Tous les agents s'orientent de proche en proche, à l'échelle des cellules de végétation. Mais seuls les leaders expriment un niveau supérieur de choix, dit global, à l'échelle des unités de végétation. C'est pour cela que les leaders doivent connaître les entités UnitéDeVégétation. Ces entités sont des compositions de cellules de végétation de même « état » (par exemple, rizière ou végétation spontanée basse et dense, ou encore végétation spontanée haute et peu dense, etc.). C'est le circuit de chaque leader qui est analysable. Un circuit est construit comme une collection des cellules visitées par un leader donné, à chaque pas de temps. Ce circuit, ainsi que les variables de la classe SortiesCircuit émergent des choix, localement mais aussi globalement. Il y a une influence de la position des aménagements sur ces règles de choix, d'où les connections avec les cellules mais aussi avec les unités de végétation. p. 91

- *Corps de chapitre*

Figure 1. Modèle conceptuel du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur un territoire agropastoral tropical. Le système villageois agropastoral englobe plusieurs classes d'entités liées par des liens de dépendance, de composition ou d'interaction. Les flèches pleines, épaisses, et celles en pointillés représentent les processus de prime importance liant les pratiques de l'éleveur, le troupeau, et les individus au parcours. L'agro-éleveur influe sur son troupeau par ces pratiques. Les individus composent le troupeau comme un agrégat complexe. Si la classe Individu porte principalement les attributs qui caractérisent les ruminants, la classe Réponse englobe les fonctions qui permettent à l'Individu de formuler un choix spatialisé ou d'estimer une quantité de matière à ingérer. Cette réponse est en grande partie liée aux informations issues du parcours. Le parcours est composé de ressources agropastorales et d'aménagements. Parallèlement, les choix des individus ont, par propriétés, un effet sur leurs performances, qui contribuent au comportement apparent du troupeau, et qui influent sur l'économie de l'agro-éleveur. p. 99

Figure 2. Carte pixélisée du territoire villageois agropastoral de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal). Les unités de végétation, agrégats de cellules unitaires carrées, forment l'environnement de trois agents Troupeaux, en plus des aménagements (parc de nuit et point d'eau). Les 315 unités de végétation sont une échelle d'hétérogénéité à l'intérieur de faciès morphopédologiques du territoire : plateau forestier, glacis en partie cultivé et bas fonds à rizières, bordés par la palmeraie. p. 104

Figure 3. Répartitions des facteurs d'entrée du modèle PastoTrop (PastoTrop.v2.1) dans l'inter structure des tableaux par agent de combinaisons validées (méthode *Statis*). L'ensemble des facteurs est projeté, soit douze facteurs insérés dans les règles de choix global (G) et local (L). Schématiquement, plus les facteurs sont éloignés du centre, plus ils sont explicatifs de la variabilité des simulations. p. 111

Figure 4. Distances parcourues quotidiennes simulées, en mètres, pour chaque agent. Les simulations résultent des 640 combinaisons testées, répétées 10 fois. Les zones en pointillés représentent les intervalles de distances observées (agents 1 et 2) ou extrapolées (agent 3). p. 116

Figure 5. Courbes moyennes des temps de résidence des bovins observés (5.a) en milieu de saison sèche ou simulée (5.b) dans un environnement aux conditions proches du milieu de saison sèche. En 5.a, les troupeaux (1.) s'éloignent du parc de nuit pour (2.) atteindre des jachères où ils sont relativement stables et ingèrent des pailles de graminées. Ils rejoignent progressivement la rizière (3.) où ils s'abreuvent, et où ils restent stables le reste de la journée (4.) en consommant les pailles de riz. Enfin, ils quittent la rizière en fin de journée (5.), passant par les prairies sous palmeraie où ils ingèrent des herbacées diverses, mais principalement des graminées épiées, avant de rejoindre les alentours du parc de nuit. La zone hachurée englobe les temps où les animaux sont de nouveau à l'attache. p. 119

Figure 6. Variabilité des quantités ingérées (QI) des agents 1 (représentant un petit troupeau) et 2 (représentant un grand troupeau), estimées par trois méthodes. La méthode « MM » est l'application des modèles Michaëlis-Menten de prédiction des vitesses d'ingestion (VI) instantanées à partir des biomasses disponibles (Chirat et al. submitted-a). La méthode « MM forçage » résulte de la relation linéaire forcée par 0 entre les QI et les VI instantanées estimées à Saré Yoro Bana : les VI sont divisées systématiquement par 3. Enfin, la méthode de découpage « régulier » de l'ingestion fixe les VI constantes à chaque pas de temps, comme le résultat de la QI prévisionnelle divisée par le nombre de pas de temps prévu. p. 121

Figure 7. Composition des régimes des agents 1 et 2, comparés aux régimes observés à Saré Yoro Bana sur le milieu de saison sèche. Agent 1 et 2 représentent les valeurs simulées alors que la partie droite représente les régimes observés en MMS. p. 122

Discussion Générale -----

Figure 1. Représentation d'un système d'élevage divaguant sur parcours, dont certaines actions (ingestion, piétinement, etc.) génèrent des facteurs de variation (préhensibilité, temps de libre pâture, etc.) des vitesses d'ingestion. p. 138

Figure 2. Conceptualisation du lien entre portabilité et abstraction d'un modèle, comme sources de généralité des processus représentés (schéma adapté d'un projet d'ingénierie, de Fletcher et Worthington, 2009). p. 140

Figure 3. Processus récursif de reconstruction des circuits des troupeaux bovins observés dans la région de Kolda. Les agents Troupeaux (Agent 1 ou Agent 2), à l'attache la nuit, ont un temps de parcours de 12h maximum par jour. Ils passent nécessairement par un point d'eau. L'orientation dans l'espace résulte de deux règles de choix intégrant chacune six facteurs, liés ou non à la végétation. Le facteur d'attraction aux aménagements est temps dépendant. Le retour au parc est paramétré en fonction de l'heure observée d'attache (i.e. 12 h maximum à partir de l'heure de départ). Par la procédure de validation V, on peut vérifier l'écart E entre circuits simulés et circuits observés. Il s'agit alors de modifier les pondérations des facteurs (Facteurs i = combinaisons des pondérations des 6 facteurs par règle pour l'Agent i), simuler à nouveau et examiner les variables de sorties. p. 141

Figure 4. Proposition d'adaptation du modèle PastoTrop aux conditions pastorales sahéniennes observées dans la région de Dahra. Il ne serait nécessaire que de modifier dans le modèle les heures entrées de passage aux aménagements. p. 142

Figure 5. Schéma d'encapsulation des grandes entités agissantes dans la représentation du comportement spatial et alimentaire de bovins en libre pâture sur parcours tropical. Les agents Vaches composent des entités Troupeaux, organisées par des entités Eleveurs. Les choix, globalement et localement sont effectués au niveau du troupeau. Mais localement, le choix est ajusté par la vache, ce qui peut moduler son activité et son ingestion. p. 145

Liste des tableaux

Chapitre 1-----

- *Article*

Table 1. Summary of cows daily intake rates in the sahelo-soudanien agropastoral territory (south of Senegal). DIR, in kg of dry matter, are segmented according to seasons: early, mid and late dry season (respectively EDS, MDS and LDS). First line of one given season indicates DIR estimated from faeces quantities and dry matter digestibility (DIRfq, equation [1]). Second line indicates DIR estimated from faecal indexes predicted through NIRS (DIRni). The class 'distances' gives the average distance (arbitrary unit) of the NIRS-tested faecal samples to reference data. p. 37

Table 2. Significance (*F*-test) of the linear model factors (first column) fitting undirectly-estimated daily intake rates of cows (DIRfq), in a sahelo-soudanien agropastoral territory. Data were dispatched into parts of the dry season: early (EDS), mid (MDS) and late dry season (LDS). Average DIRfq (*m*) are precised per season. DIRfq are also noted when a factor influence significantly on the intake level, from the reference DIR-value *m*. p. 38

Table 3. Summary of cows' instantaneous intake rates (IIR, g DM/min) on some cover types of the sahelo-soudanien agropastoral territory (south Senegal). These IIR did not appear to really depend on biomass (Bm), contrary to the functional response theory, unless the range of Bm observed values is not wide enough to be extrapolate by a predicting model. The cover type "high green grass & leg." is a mixed cover of high green material with grass and leguminous species. The "senescent fruits" were collected in late dry season. p. 42

Table 4. Estimations and test of C_{st} and C_{nSt} parameters per season (early- = EDS, mid- = MDS and late dry season = LDS) in linear models [4] linking DIR to IIRst and IIRnst, in agropastoral situation. Significance of coefficients (*P*-values, *t*-test) are precised, as the determination coefficient R^2 of the model. p. 42

Table 5. Daily intake rates (DIR, in kg Dry Matter per day) estimations from published works on tropical cattle. Live weights (LW), season of interest and other conditions are indicated. p. 46

Chapitre 2-----

- *Article*

Table 1. Estimations of parameters in a linear polynomial degree 4 ($R^2 = 0.84$), for the best model of fitting circuits durations. p. 68

Chapitre 3-----

- *Corps de chapitre*

Tableau 1. Intervalle de valeurs des variables caractéristiques observées (mini. obs. et maxi obs.) mesurées sur le territoire villageois de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal), en milieu de saison sèche, pour des troupeaux de différentes tailles, classés en « petit » ($n = 11$) et « grand » ($n = 23$). Les variables sont distinguées par troupeau lorsque leurs valeurs sont significativement différentes au seuil de 0,07 ($P < 0,07$). p. 97

Tableau 2. Paramètres des modèles prédictifs des vitesses d'ingestion (g MS/min) à partir des biomasses disponibles, selon les types de couvert. Ces paramètres ont été estimés soit par l'ajustement des vitesses d'ingestion observées sur le territoire villageois de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal) par un modèle Michaëlis-Menten, lorsque cela était possible, soit à partir de la valeur médiane des vitesses d'ingestion observées (feuilles de buissons). VI max est la vitesse d'ingestion à l'asymptote. K est la valeur de biomasse lorsque la vitesse d'ingestion est égale à la moitié de VI max, l'erreur standard (e.s.) des paramètres estimés est également précisée. Les paramètres significatifs ($P < 0,05$) sont indiqués en gras. p. 98

Tableau 3. Données caractéristiques de la ressource agropastorale du territoire villageois de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal), en milieu de saison sèche. Moyenne (moy.) et écart-type (e.t.) des biomasses (Bm) sont précisées. Les indices de qualité sont relatifs correspondent aux teneurs en azote (N) et en énergie nette (E) disponibles dans les couverts pâturés. p. 98

Tableau 4. Facteurs de choix des zones de végétation du parcours des agents Troupeaux. Les trois premiers facteurs ne sont pas liés aux caractéristiques de la végétation, contrairement aux trois suivants. Chaque facteur confère une valeur normée, entre 0 et 1, à une zone de végétation donnée. Les aménagements sont le point d'eau et le parc de nuit. p. 101

Tableau 5. Surfaces des unités de végétation, définies dans le modèle PastoTrop, occupées, respectivement, aux deux tiers, au sixième puis encore au sixième, par les types de couverts consommés par les troupeaux en libre pâture au cours de la saison sèche. p. 105

Tableau 6. Etapes de travail dont le présent papier rend compte. Les étapes d'observations et de développement de la version v1 du modèle PastoTrop sont à l'origine logique des étapes suivantes, mais ont été préalablement explicitées dans le manuscrit de thèse. p. 108

Tableau 7. Hiérarchisation pour chacune des variables de sortie des 6 premiers facteurs explicatifs de la variabilité des circuits simulés, par ordre décroissant d'importance d'explication (de 1 à 6). Les six premiers facteurs sont sélectionnés par une procédure d'AIC appliquée à un modèle linéaire d'ajustement du critère donné par les 12 facteurs de choix (à l'échelle globale : G, ou locale : L) et leurs 66 interactions. p. 110

Tableau 8. Pondérations robustes des combinaisons linéaires des facteurs de choix des agents du modèle PastoTrop.v2.1. Ces résultats sont issus de 43 125 combinaisons testées, non répétées. p. 112

Tableau 9. Valeurs des variables de sortie issues des simulations permises par la combinaison des valeurs du compromis 1, Tableau 8. p. 113

Tableau 10. Valeurs absolues conservées des pondérations des facteurs combinés dans les processus de décision des agents Troupeaux. p. 114

Tableau 11. Valeurs médianes des activités émergentes des agents, à partir des sorties des 640 x 10 simulations testées. p. 116

Tableau 12. Valeurs absolues des combinaisons de pondérations retenues pour les facteurs de choix. Ces combinaisons validées (sans le critère des distances quotidiennes pour l'agent 1) assurent une stabilité des sorties d'au moins 80%. p. 117

Tableau 13. Valeurs des variables de sortie issues des simulations permises par la combinaison des valeurs du c1 (différent entre l'agent 1 et l'agent 2), Tableau 12. p. 118

Introduction Générale :

**Etude du Fonctionnement, de la Durabilité et des Impacts
Environnementaux des Systèmes de Production Extensifs en Zone
Agropastorale Tropicale**

Etude du Fonctionnement, de la Durabilité et des Impacts Environnementaux des Systèmes de Production Extensifs en Zone Agropastorale Tropicale

1. CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1. Introduction

Ce sont les pays en voie de développement qui portent la plus large proportion de ruminants, à l'échelle mondiale. Parmi les différents systèmes d'élevage, ce sont les systèmes mixtes avec cultures pluviales, i.e. agropastoral, qui compte le plus de têtes de ruminants et la plus forte production de viande de bœuf. Toujours à l'échelle mondiale, la répartition du cheptel bovin décroît depuis les aires tropicales humides, sub-humides, semi-arides, arides jusqu'aux aires tempérées. Mais les bovins des zones tropicales n'ont pas la productivité la plus forte, en viande comme en lait (Steinfeld et al. 2006). L'élevage, dans son ensemble, fournit des emplois et contribue largement au PIB des états des pays en développement. Au Sénégal par exemple, l'élevage représente environ 35 % de la valeur ajoutée du secteur agricole et participe pour 7,5 % à la formation du PIB national (ISRA 2003). Hormis des pôles péri-urbains d'élevage intensif, la majorité de l'activité reste encore rurale (Steinfeld et al. 2006). En outre, un des enjeux est que les systèmes d'élevage devront répondre aux demandes croissantes en produits animaux. La FAO prévoit une production en viande doublée entre 2000 et 2050. Pour résumer, d'un point de vue mondial, l'élevage extensif est encore aujourd'hui un système clé de ressources pour l'économie et la sécurité alimentaire au niveau mondial. Comme précisé ci-avant, cela est particulièrement vrai pour les systèmes d'élevage agropastoraux avec cultures pluviales. La zone sahélo-soudanienne sub-aride du sud du Sénégal est une zone d'élevage de ce type où, associées à l'agriculture, les déjections animales sont une source de fertilisation des cultures. Malgré des accès relatifs aux engrais minéraux, cet amendement endogène n'est pas négligeable (Manlay et al. 2004). Cette fonctionnalité s'y ajoute aux revenus des ventes de lait et animaux sur pieds.

En 1987, le rapport Brundtland définit le « développement durable », lors de la World Commission on Environment and Development. Il s'agit de « répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Selon Thompson et Nardone (1999), l'agriculture durable (au sens large) peut s'entendre selon deux axes. Le premier concerne la disponibilité des ressources exploitées. Si ces ressources restent suffisantes au terme d'un cycle d'exploitation, les pratiques agricoles mises en œuvre peuvent être qualifiées de durables. Une dynamique des pratiques, des ressources et des seuils critiques de gestion sont indispensables. L'analyse de la durabilité sur cet axe est déjà complexe puisque la disponibilité de la ressource dépend de très nombreux facteurs (climat, pratiques, infrastructures, accès au concentré, type d'élevage, etc.). Le second axe intègre d'autres composantes du système agraire que les gestionnaires cherchent à conserver, à préserver ou à optimiser. Dans le cas des systèmes agropastoraux tropicaux, il s'agit de la fertilité des sols, la taille des troupeaux, les pratiques de l'éleveur, entre autres.

Une vision plus récente du développement durable des systèmes agropastoraux propose une analyse qui dépasse leur capacité à perdurer (i.e. résilience des systèmes). Cette vision concerne aussi leur vulnérabilité et leur capacité à évoluer, à s'adapter aux contraintes d'un contexte englobant, qu'il soit environnemental ou socio-économique (Holling 2001, Dedieu et al. 2008a). La flexibilité des systèmes agropastoraux est un sujet d'actualité au Nord comme au Sud. En Europe, des études cherchent à optimiser les exploitations en terme de productions économiquement viables et d'entretien maîtrisé du territoire, par rapport à une variation politico-économique ou pédo-climatique (Dedieu et al. 2008b). L'étude de cette flexibilité des systèmes agraires peut être abordée à différentes échelles : celle du potentiel adaptatif des animaux par l'observation des régulations physiologiques mises en œuvre sous contraintes (Blanc and Bocquier 2008), celle de la productivité du système fourrager, des modes de stockage, et

stratégies d'utilisation des surfaces (Andrieu et al. 2008). Une vision intégrée à l'échelle de l'exploitation d'élevage extensif doit aussi prendre en compte la mobilité des animaux, les zones et dates de fauches, les dates de sevrage selon la disponibilité fourragère (Dedieu et al. 2008b). La flexibilité et l'adaptation des systèmes d'élevage agropastoraux aux contraintes doivent donc prendre en compte ces différents critères.

1.1.1. Caractérisation des systèmes de production pastoraux et agropastoraux. Un système de production se définit dans un environnement, spatial, économique et social. Par convention, un système appartient à une classe agro-écologique (tempérée, semi-aride, etc.). Le système est alors typé selon son ou ses activités (hors-sol, herbager, mixte, etc.), déclinables en ateliers de production. Le système de production est généralement encore plus finement décrit : situation géographique, nature des ressources et des produits (Sere et al. 1995). Comme nous l'avons précisé en introduction, les systèmes agropastoraux sont d'intérêt considérant leur contribution globale forte à la production de viande de bœuf malgré une faible productivité. Or, les systèmes de production de viande de bœuf en Afrique sub-saharienne sont largement agropastoraux et pastoraux.

Le pastoralisme est un moyen de valoriser des terres à potentiel agronomique limité. Si la disponibilité en eau est un facteur clé des systèmes pastoraux, il semble que les productions animales associées soient d'abord déterminées (et même limitées) par les ressources alimentaires disponibles (de Ridder and Breman 1991). Cet élevage ayant recours à peu d'intrants, donc extensif, dépend, quantitativement et qualitativement, de la production primaire des parcours. Les systèmes agropastoraux englobent l'utilisation, par les animaux, des parcours mais également des résidus de cultures. Le pastoralisme se définit donc en partie seulement par la mobilité des animaux. Celle-ci est cependant un atout majeur pour exploiter des ressources très variables dans le temps et l'espace, par ailleurs peu valorisables, et représente un élément important de flexibilité de ces systèmes. En Afrique sub-saharienne, l'élevage, par ses fonctions de capital sur pied (livestock) et de moyen de fertilisation des cultures, est un « pilier » des sociétés rurales, malgré une productivité naturellement limitée par les ressources (Landais et al. 1990)

Traditionnellement, la gestion des parcours et les théories d'écologie associées se sont basées sur le concept des communautés végétales climaciques, où la pression de pâturage dicte le rapprochement ou l'éloignement d'un état stable, unique, de la végétation : le climax (Stuth and Maraschin 2000). Pour atteindre cet équilibre, la végétation évoluerait en une succession d'espèces, comme le pose l'école Clementsienne. La théorie du climax se conçoit sous des climats relativement stables et une saisonnalité régulière. Considérant les parcours au Sud comme des environnements instables, l'équipe de Westoby (1989) propose le modèle « d'état-transition », qui s'appuie sur des catalogues « d'états » (discrets) et de possibles « transitions » (feu, surpâturage, sécheresse..) entre les états. Cette théorie suppose qu'il y ait plusieurs équilibres possibles selon le niveau des facteurs biotiques et abiotiques. Cette équipe proposait ainsi une nouvelle gestion des territoires, plus flexible et dynamique : une gestion « opportuniste ». Ceci conduit davantage à une évaluation des capacités d'adaptation des systèmes plutôt qu'à un diagnostic sur leurs résiliences. Le concept de « gestion opportuniste » est ancien et généralement mobilisé par les pastoralistes. Il s'agit par exemple de repérer et suivre la pousse de l'herbe. L'équipe de Westoby rappelle l'importance d'identifier les évolutions possibles du système pour adapter les pratiques à l'état du système et éviter ainsi des transitions de dégradation, à défaut d'induire des transitions jugées favorables. Certaines équipes reconnaissent l'intérêt de considérer ce qu'ils appellent des « équilibres multiples » (Perrings and Walker 1997). Plusieurs auteurs s'inscrivent dans ce nouveau paradigme, ce qui n'est pas contraire aux thèses soutenant que l'action de pâturage reste particulièrement menaçante pour les états d'équilibre (Illius and O'Connor 2000, Weber et al. 2000). D'autres auteurs enfin, s'opposent formellement à la notion d'équilibre, qu'il soit climacique ou multiple. Toutefois, cela ne remet pas en question le mode de gestion « opportuniste ». Sullivan et Rohde (Sullivan and Rohde 2002) défendent farouchement la théorie du « non-équilibre », élaborée par Wiens en 1984 pour les écosystèmes en zones sèches. La

théorie du non-équilibre suppose que les facteurs abiotiques (pluviosité, feu...) ont un impact majeur sur l'évolution des paysages, minimisant la responsabilité de l'élevage dans la dégradation supposée des territoires (Behnke and Scoones 1993).

La description d'un système doit prendre en compte, en outre, l'environnement socio-économique. Rodriguez (2008) propose de considérer les « flux d'avantages » générés par les activités pastorales sur les territoires. Il suggère que la comparaison de la valeur ajoutée des productions issues de l'exploitation des terres marginales par le pastoralisme avec celles de productions alternatives serait plus pertinente que la contribution du pastoralisme à une économie nationale. Mais nous ne développerons pas davantage la composante socio-économique dans ce travail.

1.1.2. Problématiques et enjeux liés aux espaces pastoraux et agropastoraux. Une récente analyse de la FAO souligne une productivité insuffisante des systèmes (agro)pastoraux pour répondre à la demande mondiale et leurs impacts environnementaux négatifs sur les sols et l'atmosphère (Steinfeld et al. 2006). Pourtant, l'élevage extensif est un secteur d'activité particulièrement structurant pour les populations rurales en Afrique sub-saharienne par ses fonctions économique, écologique (gestion des écosystèmes, transfert de matière organique) et sociale. Elevage et agriculture, pour l'autoconsommation et la génération de revenus, sont à la base des sociétés agropastorales d'Afrique sub-saharienne. Dans ces systèmes d'élevage souvent divagant, les troupeaux exploitent en libre pâture les résidus de cultures en plus des marges sylvopastorales. La libre pâture intervient surtout en saison sèche. Lors de l'hivernage (saison des pluies), les animaux sont éloignés des finages villageois, sous cultures pluviales. Après les pluies viennent les récoltes, qui marquent le début de la « vaine pâture », période d'exploitation quasi exclusive des résidus de cultures par le bétail (Kennedy 1995, Ickowicz and Mbaye 2001). Les animaux parcourent d'assez longues distances quotidiennement, sur une ressource disponible qualitativement pauvre et qui s'amenuise encore avec l'avancée de la saison sèche.

L'ajustement du disponible fourrager peut passer par du défrichage voire de la déforestation. L'évaluation de la durabilité des systèmes d'élevage en Afrique sub-saharienne passe donc par l'étude des conduites des animaux eu égard aux moyens mis en œuvre, et par l'étude de la gestion du milieu exploité, vu les demandes croissantes en produits animaux et la diminution des espaces disponibles pour l'élevage.

1.2 Les différentes approches adoptées pour traduire les interrelations entre élevage et ressources alimentaires

Les problématiques de durabilité des élevages (agro)pastoraux, de productivité des troupeaux et d'impacts des troupeaux et des pratiques sur les milieux des systèmes sur parcours agropastoraux ont donné lieu à nombre d'ouvrages (cf. Range Ecology at Disequilibrium de 1993, Rangeland Ecology and Management de 1994) et de revues scientifiques spécialisés, africains (African Journal of Agricultural Research, African Journal of Ecology, African Journal of Range & Forage Science, South African Journal of Animal Science), américains (Range Ecology & Management), australiens (Australian Journal of Agricultural Research, Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry), pour ne citer que les plus connues.

Dans ces systèmes complexes, au sens de Le Moigne (1990), il y a eu de nombreux axes d'étude. Nous en introduisons certains ici, sans être exhaustifs.

1.2.1. Approche socio-économique. L'approche des interactions entre troupeaux et parcours peut concerner sa composante socio-économique. Le système englobe des pratiques, liées à une certaine acception du territoire exploité (Caron 2005, Bassett et al. 2007). L'étude de la durabilité des pratiques peut en effet passer par l'évaluation des effets de moyens incitatifs politiques et financiers sur les ressources agropastorales et sur l'adaptation des pratiques au cadre socio-économique (Lalba et al. 2005). Mais nous ne développons pas davantage cet aspect.

1.2.2. Approche agronomique intégrée. L'approche peut se situer à l'échelle de l'association entre ressource végétale et état du sol. Certains auteurs ont étudié les bilans de matières à l'échelle d'un territoire agropastoral, par les transferts de matières organiques liés aux activités anthropiques et aux circuits des troupeaux (Manlay et al. 2000, Masse et al. 2004). D'autres ont tenté de comprendre comment les charges animales s'articulent avec les facteurs abiotiques, tels que la pluviosité, dans la dégradation des territoires de zones sèches (Yonkeu 1991, Pickup et al. 1998, Fynn and O'Connor 2000, Rietkerk et al. 2000, Sharp and Whittaker 2003, Savadogo et al. 2007). Les conclusions de ces études montrent que les troupeaux, à travers les transferts de matière organique, peuvent entretenir à eux seul la fertilité d'une partie des terroirs. Mais par leur piétinement, ils peuvent également dégrader les parcours, particulièrement à la suite d'aléas climatiques ayant préalablement altérés les sols et couverts végétaux. Comme nous l'avons déjà précisé dans la définition des systèmes de production (agro)pastoraux, la mobilité des troupeaux est centrale dans la flexibilité de ces systèmes. Ce n'est toutefois pas toujours suffisant en cas d'aléas climatiques limitant la ressource sur plusieurs années. Pour alerter d'accidents climatiques, des systèmes d'alertes précoces ont été développés. Le principe des systèmes d'alerte précoce repose sur des observations régulières de la végétation (couverts, stades phénologiques, dominances d'espèces) et d'interprétations d'indices de végétation sur des images satellitales (Secka et al. 1991). Ces réseaux ont été développés pour limiter la dégradation des milieux par une trop lourde charge animale sur un parcours dégradé (Sharp and Whittaker 2003) et permettre potentiellement aux pasteurs d'anticiper le marché pour déstocker leur troupeau à un prix raisonnable.

1.2.3. Approche zootechnique. Dans une approche zootechnique, au sens strict, les auteurs évaluent le potentiel productif des bovins (Missouhou et al. 1997, Rekwota et al. 2000, Marichatou et al. 2005, Abdalla and Elsheikh 2008), ou les performances observées sous différents régimes alimentaires, en milieux contrôlés (Rogosic et al. 2006, Ngongoni et al. 2007, Ouedraogo-Kone et al. 2008, Ngodigha and Oji 2009), ou bien encore les performances obtenues sous contraintes parasitaires (Bosso et al. 2009). En outre, certains auteurs ont cherché à quantifier les besoins énergétiques quotidiens de ruminants sur parcours en zones sèches (Dijkman and Lawrence 1997, Henrique et al. 2005, Lachica and Aguilera 2005, Brosh et al. 2006), et à fixer les équivalences entre état corporel et quantités d'énergie nette mobilisable ou stockable (Cissé et al. 1999). D'autres ont aussi cherché à prévoir les évolutions d'état corporel, selon la ressource fourragère, ou même la saison et la taille du troupeau (Cissé et al. 2003, Ezanno et al. 2003), pour finalement se focaliser sur la prévision des performances (Ezanno et al. 2005). Ainsi, il existe des données sur les performances de production potentielle ou observée sur parcours, ainsi que sur les dynamiques de production, pour différentes races de bovins tropicaux.

1.2.4. Approche éthologique des ruminants sur parcours. Des études ont proposé des descriptions et des interprétations évolutionnistes des processus génériques de socialité au sein des groupes de bovins (Dumont and Boissy 1999, Bouissou and Boissy 2005, Harris et al. 2007). Sur parcours, l'étude du comportement social des ruminants passe aussi par l'intégration des phénomènes de leadership (Reinhardt 1983, Dumont et al. 2005). En effet, l'étude des processus de déplacement est fondamentale puisque la mobilité des troupeaux représente un élément majeur de flexibilité des systèmes agropastoraux en zones sèches. Si le leadership est une composante forte de ces processus de déplacement, les préférences alimentaires exprimées par les animaux et en particulier la sélection de la ressource consommée en est une autre. Certains auteurs ont donc cherché à mettre en évidence l'expression des préférences alimentaires sur parcours d'une espèce de ruminant (Agreil et al. 2006), ou à les comparer pour plusieurs espèces utilisant le même territoire (Etzenhouser et al. 1998, Garine-Wichatitsky et al. 2004). La sélection de la ressource peut ainsi se concevoir à plusieurs échelles spatio-temporelles. La définition proposée par Nams (2005), qui considère que les ruminants organisent leurs déplacements selon des facteurs agissant à différentes échelles nous paraît intéressante. Elle conçoit que les animaux évoluent dans une

mosaïque de ressources, hiérarchisées. En effet, on peut considérer que les herbivores réagissent à leur environnement par une hiérarchie d'actions comportementales qui résultent de la variété de répartition de la végétation, à l'échelle du territoire comme à l'échelle du site alimentaire, du patch ou de la station alimentaire (Bailey et al. 1996, Fuhlendorf and Engle 2001). D'après Bailey et al. (1996), le site alimentaire peut être une parcelle (champ de maïs), en tout cas une unité de végétation motif d'hétérogénéité au sein d'un faciès morphopédologique (forêt, bas-fond, etc.). Le patch lui peut être défini comme un couvert végétal limité se situant autour d'un ruminant que celui-ci va exploiter pendant une séquence continue d'ingestion. La station alimentaire est l'échelle de végétation inférieure qui se situe autour de la tête du ruminant.

Si la sélection des sites alimentaires sur parcours comporte plusieurs activités elle est surtout le résultat de préférences alimentaires qui sont une caractéristique intrinsèque des ruminants (Dumont 1996). Nous ne souhaitons pas développer davantage les mécanismes de sélection alimentaire ici, qui nécessiteraient d'aborder plus en profondeur les mécanismes d'intégration des stimuli variés de l'environnement social, spatial et temporel des animaux. Nous terminons sur l'approche éthologique des systèmes d'élevage sur parcours en ajoutant que la sélection de sites, qui peut varier dans l'espace et dans le temps, ne dépend pas uniquement de la végétation, à différentes échelles, ou de la répartition des individus, localement. Il y a des déterminants physiologiques (comme la satiété) et des contraintes non-alimentaires (repos, gardiennage) ou non directement alimentaire (évitement d'un obstacle). Nombre d'études analysent l'influence de facteurs abiotiques (i.e. pente, point d'eau) sur le comportement des troupeaux et l'intérêt de les intégrer dans l'analyse de la gestion des parcours (Bailey et al. 1996, Ganskopp 2001). Cette potentialité d'influer sur les circuits des ruminants par des facteurs non-alimentaires est un point central de ce travail de thèse. Nous aurons à le développer plus loin.

1.2.5. L'avenir des systèmes agropastoraux tropicaux. Pour appuyer la problématique de ce travail, nous rappelons que la FAO a dressé un constat : la flexibilité des systèmes agropastoraux semble ne plus être ajustable. C'est le cas en particulier en Asie centrale et en régions sahéliennes. Pour ces deux zones, l'explication avancée est l'augmentation de la population humaine associée à un emblavement croissant des terres de parcours. Cette seconde composante est d'ampleur en Afrique sub-saharienne (Steinfeld et al. 2006), elle conduit à des systèmes d'élevages qui ne sont plus uniquement pastoraux mais deviennent agropastoraux, associant ressources naturelles et une partie des ressources cultivées. Conscients des risques environnementaux liés à une potentielle mauvaise gestion des territoires, où l'élevage est omniprésent mais mis en difficulté, et des besoins d'accroissement de la productivité, notre approche est en accord avec la thématique d'intensification écologique qui est conduite à l'UMR ERRC.

2. ETAT DES CONNAISSANCES ET OPTIONS POUR L'EVALUATION DES SYSTEMES AGROPASTORAUX

2.1. La formalisation du fonctionnement des systèmes agropastoraux permet d'envisager leur représentation

Les travaux sur la durabilité de ces systèmes de production agropastoraux, structurant d'un point de vue spatial, social et financier pour de nombreuses populations rurales et même plus largement pour des états d'Afrique sub-saharienne, incluent des études globales sur le comportement alimentaire et spatial des bovins sur parcours (Bayer 1990, Rittenhouse 1991, Ayantunde et al. 1999, Coppolillo 2000, Parsons and Dumont 2003, Ouedraogo-Kone et al. 2006, Sanon et al. 2007). L'analyse des suivis sur parcours permet l'établissement de lignes directrices de gestion pour la durabilité des écosystèmes de parcours (Hodgkinson 1991, Behnke and Scoones 1993, Pickup et al. 1998, Rietkerk et al. 2000, Adler et al. 2001, Farnsworth and Anderson 2001, Fuhlendorf and Engle 2001, Hoffmann et al. 2001, Adler and Hall 2005, Bailey 2005,

Launchbaugh and Howery 2005). L'observation et la description du comportement spatial et alimentaire des ruminants sur parcours permettent, en outre, la formalisation de règles de comportement, c'est-à-dire d'un cortège de réponses à des échelles diverses du milieu (Pyke 1984, Laca and Demment 1996, Laca 1998, Bergman et al. 2001, Rook et al. 2005), rendant possible la modélisation des systèmes sur parcours. La finalité, et non nécessairement l'objectif propre, des études des systèmes sur parcours par la représentation simplifiée dans un modèle est aussi l'établissement de lignes directrices de gestion pour la durabilité des écosystèmes de parcours.

2.2. L'intégration de la mobilité des animaux est indispensable à la représentation du système agropastoral

Nous devons insister sur les éléments qui sont particulièrement liés à la mobilité des troupeaux, important déterminant de flexibilité et donc d'évaluation de la durabilité de ces systèmes. Ces éléments sont les différents facteurs qui influencent la sélection de sites privilégiés successivement sur le parcours mais qui dépendent fortement des moyens disponibles pour décrire et analyser les déplacements des animaux, puis pour les représenter. La construction d'un circuit sur le territoire (agro)pastoral passe par l'intégration ordonnée des sites sélectionnés par les animaux. Parmi les éléments préalablement présentés, il faut s'intéresser en particulier à la description de la sélection des sites alimentaires et non-alimentaires sur les circuits (comme rejoindre le point d'eau, les parcs de nuit, l'évitement des mises en défens de cultures). Mais nous aurons à nous demander s'il faut chercher à définir la dynamique des décisions prises par certains animaux, leaders, plutôt que d'autres, ou même à chercher à représenter finement la localisation d'un individu au sein du groupe vu sa position sociale. Il faudra se demander s'il est nécessaire de se situer à l'échelle de l'individu pour représenter convenablement le comportement spatial d'un troupeau sur parcours.

Dans cette thèse, nous chercherons surtout à décrire et reproduire les circuits de ruminants, qui sont un préalable à la quantification de l'impact environnemental des troupeaux sur un territoire, et à l'évaluation de leur impact sur les performances individuelles en fonction des saisons (Ezanno et al. 2003). En effet, si ces aspects sont des sorties finalisées en terme d'évaluation de la durabilité des systèmes agropastoraux, il est essentiel de spatialiser les activités des animaux.

2.3. Les formalismes de représentation des circuits de ruminants sur parcours

La description et la représentation d'un système de ruminants sur parcours par l'interaction entre ressources végétales et animaux sont profondément ancrées chez les zootechniciens. Cependant, des chercheurs d'autres disciplines ont proposé des approches différentes et complémentaires. Certains auteurs se sont intéressés aux trajectoires des animaux sauvages et domestiques, et ont proposé des formalismes mathématiques d'analyse (Morales and Ellner 2002, Benhamou 2004, Nams 2005, Barraquand and Benhamou 2008, Bartumeus et al. 2008), ce qui permet de disposer de démarches et d'outils intéressants pour tenter de représenter les circuits de nos troupeaux. En particulier il est apparu intéressant d'utiliser les dimensions fractales (Perrier 2002, Nams 2005) et les méthodes d'évaluation des temps de résidence (Benhamou, 2004) pour pouvoir segmenter les circuits en périodes de comportement alimentaire spatialisé relativement homogène (cf. premier chapitre).

Sélections alimentaires, réactions aux facteurs abiotiques du parcours et trajectoires sont les composantes du système complexe que nous voulons représenter. Or, la représentation et l'analyse des systèmes complexes passe généralement par la modélisation orientée objet. C'est une voie pragmatique de constitution d'un système pour lequel nous ne connaissons sans doute pas tous les composants et processus, ni ne maîtrisons toutes les interactions. Les modèles orientés objet ont largement été utilisés pour représenter les déplacements et l'ingestion d'animaux simulés à partir de règles de décision et d'action que les auteurs ont souhaité tester

(Roese et al. 1991, Farnsworth and Anderson 2001). Certains modèles ont permis de proposer une conceptualisation pertinente de la représentation d'un système biologique, ou des avancées méthodologiques quant à la représentation du système : prise en compte de la socialité (attraction et répulsion) dans les processus d'orientation (Beecham and Farnsworth 1998) et partage de l'information (Reynolds 1987, Couzin et al. 2005), intégration d'items mémoriaux (Dumont and Hill 2001, Anderson 2002), développement de fonctions dynamiques d'attraction des animaux pour des points de passages obligatoires (Cambier et al. 2005). D'autres auteurs, enfin, réalisent un travail plus en amont, proche de la thématique de l'Intelligence Artificielle, sur la formalisation des déplacements théoriques d'animaux, à différentes échelles. Cela passe par la recherche de cadres conceptuels unifiés de construction des déplacements, qui peuvent être catégorisés en non-orientés, orientés par perception ou par mémoire (Mueller and Fagan 2008). Comme nous l'avons déjà dit, nous avons peu travaillé sur la prise en compte de la socialité, puisque nous avons cherché à rester le plus possible au niveau du troupeau. En revanche, nous nous sommes efforcé à représenter différents niveaux d'hétérogénéité spatiale ainsi que les aménagements du parcours, et les voies par lesquelles les ruminants y réagissent.

2.4. Les principes de notre démarche de modélisation

Il est dommage que parfois, certains modèles de systèmes biologiques ne s'intègrent pas dans une démarche assez rigoureuse ou, du moins, sont publiés comme étant plus vertueux qu'ils ne le sont. Contrairement à des modèles du domaine de l'Intelligence Artificielle, les modèles d'écologie, par exemple, ont généralement pour objectif la représentation simplifiée mais non fautive d'un système réel. Grimm (1999) déplore le manque de clarté entre les motivations « pragmatiques » et les motivations « paradigmatiques » des chercheurs. Le pragmatisme fait référence aux réalités biologiques qui doivent être présentes dans un tel modèle, reconnaissant toutefois qu'un certain nombre de lois reposent sur des paradigmes. Le classement des commandes d'un modèle écologique en pragmatique et paradigmatique souligne le fait que ces commandes n'adoptent pas forcément un formalisme mathématique strict. En effet, un certain nombre de lois de réponse d'un animal à son environnement peuvent être formulées suite à une interprétation du modélisateur : c'est alors une heuristique, qui doit répondre à l'objectif de représentation, sans que l'on ait la certitude de son optimalité. L'exemple classique est celui du voyageur de commerce : il doit rejoindre toutes les villes d'une carte avec le moins de coût possible. L'heuristique prévoit qu'il rejoigne les villes de proche en proche à partir de son point de départ. Plus récemment, Grimm et al. (2006) proposent un cadre de présentation standard des modèles en écologie, déplorant le côté « boîte noire » des modèles publiés encore à présent.

Pour notre part, notre démarche est assez claire. Nous cherchons à représenter le comportement de bovins sur parcours, c'est-à-dire à reconstruire les circuits quotidiens des troupeaux, émergeant d'une heuristique d'implémentation issue des observations menées sur le terrain et de résultats de la bibliographie. L'approche d'un système est à la fois descriptive mais aussi « constructiviste ». En effet, un système n'est pas un simple objet et sa connaissance n'est pas un simple résultat. Un système est un processus récursif, sa connaissance est l'action de le construire (Le Moigne 1977, Walliser 1977, Le Moigne 1990, Ferber 1995).

3. LE PROJET DE RECHERCHE ET LA METHODE D'ETUDE

3.1. L'hypothèse de recherche et nos objectifs

Si les problématiques de productivité et de durabilité des systèmes d'élevage sur terres de parcours ont déjà été largement abordées sous différentes latitudes, les systèmes agropastoraux d'Afrique sub-saharienne restent peu référencés. Ainsi, l'estimation du besoin d'entretien des bovins N'Dama (2,3 Unité Fourragères pour 250 kg de poids vif) remonte au début des années 1990 (cf. Ezanno 2002). Vu les difficultés des observations sur parcours, du fait de la mobilité des

animaux, du climat et des difficultés pour contrôler le milieu, peu d'études peuvent faire le lien entre le comportement spatial et alimentaire des animaux sur parcours, leurs impacts sur le milieu et leurs performances. Les parcours journaliers des troupeaux sur parcours et leur comportement spatial ont été peu décrits (Dicko and Sangare 1991, Ayantunde et al. 1999, Sanon et al. 2007), et n'ont pratiquement pas été abordé en termes de déterminants et de processus de choix (Clanet 1994, Toutain et al. 2003).

Pour traiter cette question dans le cadre de cette thèse, il paraissait ainsi nécessaire d'intégrer les indicateurs de besoins journaliers, d'états corporel et de performances mesurés en station expérimentale ou obtenus par enquêtes sur parcours, avec les résultats d'études descriptives du comportement social, spatial et alimentaire, puisque s'agissant d'animaux ils sont soumis à des boucles de régulations biologiques qui traduisent leur capacité d'adaptation à leur milieu (Blanc et al. 2006). Une partie de la validation de notre modèle devait consister à discuter de la vraisemblance des résultats obtenus, par exemple, en matière de quantités ingérées ou de variation de note d'état corporel. Si cette étape de modélisation ne fut pas prioritaire (car déjà à l'aboutissement de l'établissement du lien entre simulation du comportement spatial et alimentaire et des performances observées), nous l'abordons dans la Discussion générale de ce projet.

En plus des mesures directes sur nos terrains d'études sub-sahariens (Fig.1, ci-après) et de l'expertise acquise sur ces zones, nous partons de deux études de référence. En premier lieu, celle de Bailey et al. (1996) qui propose une synthèse relativement exhaustive des facteurs susceptibles d'influer sur le comportement de bovins en libre pâture. Ils présentent un modèle conceptuel conférant une valeur intrinsèque aux sites alimentaires, définis plus haut, composant le territoire. Cette valeur-score à laquelle les bovins doivent répondre, est modulée en partie par la prise en compte des facteurs abiotiques (i.e. pente, point d'eau). Les auteurs insistent sur l'importance de cette intégration. La seconde étude a été réalisée par Ganskopp (2001). L'auteur indique qu'après les mises en défens, « l'eau et le sel sont les deux manières les plus fréquemment utilisées pour influencer sur la distribution des troupeaux en extensif ». Il teste l'efficacité de la répartition des points de sel et d'eau dans l'attraction des animaux, sur des pâturages de plus de 800 ha en zone sèche américaine. Ses résultats suggèrent que les troupeaux sont fortement liés au point d'eau. Le sel en revanche semble n'avoir qu'une influence très limitée sur la distribution des animaux, dans ce large milieu sec.

Sur les territoires d'Afrique sub-saharienne, où la productivité des bovins est largement en deçà de leur potentiel et où l'impact sur la ressource interroge la communauté des pastoralistes, nous avons donc pu formuler cette hypothèse : comme les bovins réagissent à des points attracteurs (abiotiques comme le point d'eau, ou biotiques comme des zones d'alimentation préférées), il est possible d'influer sur la gestion des parcours et sur les performances animales en travaillant sur la position d'aménagements « contraignants » (parc de nuit, point d'eau, mises en défens, voire banques fourragères). Vu l'importance des facteurs abiotiques dans les circuits quotidiens des animaux, nous suggérons que la description fine de la végétation pour une représentation réaliste de la ressource n'est pas une priorité. En jouant sur la position d'aménagements, en particulier points d'eau, parcs de nuit ou aires de repos, nous supposons qu'il est possible d'optimiser les performances des bovins sur parcours et de moduler leur impact sur les ressources. Les objectifs de cette thèse sont de décrire, d'analyser et de hiérarchiser par la modélisation les facteurs-clés du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours agropastoral tropical sec, pour évaluer la pertinence de notre hypothèse. Pour établir notre modèle, nous allons à la fois utiliser des formalismes développés par Cambier et al. (2005) et proposer nos propres formalisations au vu de la bibliographie et de notre expertise. Cela est présenté dans le deuxième et le dernier chapitre.

Conscients des risques environnementaux liés à une potentielle mauvaise gestion des territoires, où l'élevage est omniprésent, et des besoins de productivité, notre approche est en accord avec la thématique d'intensification écologique.

3.2. Les ambitions et les limites de cette thèse

Ce travail de thèse contribue à un objectif plus général d'évaluation de la durabilité de systèmes agropastoraux en libre pâture en zones sèches. Dans ces milieux peu référencés, il a été nécessaire de sélectionner une zone d'étude pour décrire le comportement spatial et alimentaire des troupeaux sur ces parcours, mais nous le verrons, nous ne sommes parvenus, par l'accumulation de difficultés à trouver un compromis entre réalisme, parcimonie et propriétés émergentes du système complexe représenté, à prévoir par modélisation les performances des animaux. La principale zone d'étude est la région de Kolda, au sud du Sénégal, zone sub-aride ou sub-humide sahélo-soudanienne. Notre ambition, concernant un modèle de recherche, a été de le confronter à la représentation d'un autre système de libre pâture sur parcours, pour en évaluer la généricité. Une seconde zone d'étude, d'investigations plus légères, a donc été utilisée, dans la région de Dahra, nord du Sénégal, zone semi-aride sahélienne. La discussion des résultats obtenus suite à un paramétrage, qui reste assez lourd, nous permettra d'évaluer les conditions de généricité de notre modèle.

Le travail réalisé au cours de cette thèse englobe à la fois (1) une description fine du comportement spatial et alimentaire des troupeaux bovins N'Dama en libre pâture dans la région de Kolda, (2) une comparaison avec les observations conduites dans la région de Dahra sur des zébus Gobra afin d'exprimer a priori les difficultés méthodologiques de la transposition du modèle exploratoire PastoTrop développé à partir des travaux à Kolda vers d'autres zones sèches, et (3) le calibrage d'une règle de réponse parcimonieuse d'agents simulants des troupeaux aux ressources agropastorales.

3.3. Présentation des terrains d'étude en Afrique sub-saharienne

3.3.1. La zone sahélo-soudanienne sub-aride agropastorale de Kolda. La région de Kolda est un territoire mixte d'élevage extensif de taurins N'Dama (80% des UBT) et d'élevage secondaire de petits ruminants (20% des UBT) et de cultures pluviales (sorgho, maïs, mil, coton, arachide). Le territoire est légèrement vallonné, composé d'une succession de finages villageois séparés par des cordons et plateaux forestiers et par les bas fonds où sont implantées les rizières. En saison sèche, de fin octobre à mi juin, les bovins sont attachés la nuit sur une des parcelles de l'éleveur sédentaire pour la fumer. Ils sont lâchés en libre pâture le matin, après la traite, et peuvent exploiter les résidus de cultures, en plus des ressources spontanées du parcours. Pendant la saison des pluies (environ 1000 mm/an), les animaux sont gardés en forêt, éloignés des cultures. Nous nous limitons généralement à l'analyse du comportement des vaches pendant la saison sèche, lors de la libre pâture, puisqu'il n'y a pas de moyen humain pour les conduire. Le territoire villageois étudié en particulier s'étend sur environ 20 km². La distance séparant les parcs de nuit et les points d'abreuvement dépasse rarement 2 km (cf. Annexe 3).

Nous disposons de cinq années d'observations antérieures des circuits journaliers, de l'alimentation ainsi que des performances zootechniques des bovins sur cette zone, issues du programme Alimentation du Bétail Tropical (cf. Ickowicz and Mbaye, 2001), du CIRAD en partenariat avec l'ISRA, dans une base de données ancienne (cf. Annexe 4). Nous avons procédé à des observations complémentaires en termes de description des circuits et de prélèvements par les animaux (quantités ingérées quotidiennes, vitesses d'ingestion instantanées). Ces travaux de terrain ont été nécessaires pour bien connaître la réalité du terrain, pour mieux comprendre les données antérieures, et pour combler les lacunes de la base de données qui avait été établie pour décrire le système d'alimentation en lien avec les performances. Les résultats obtenus sur cette zone d'étude nous servent de références.

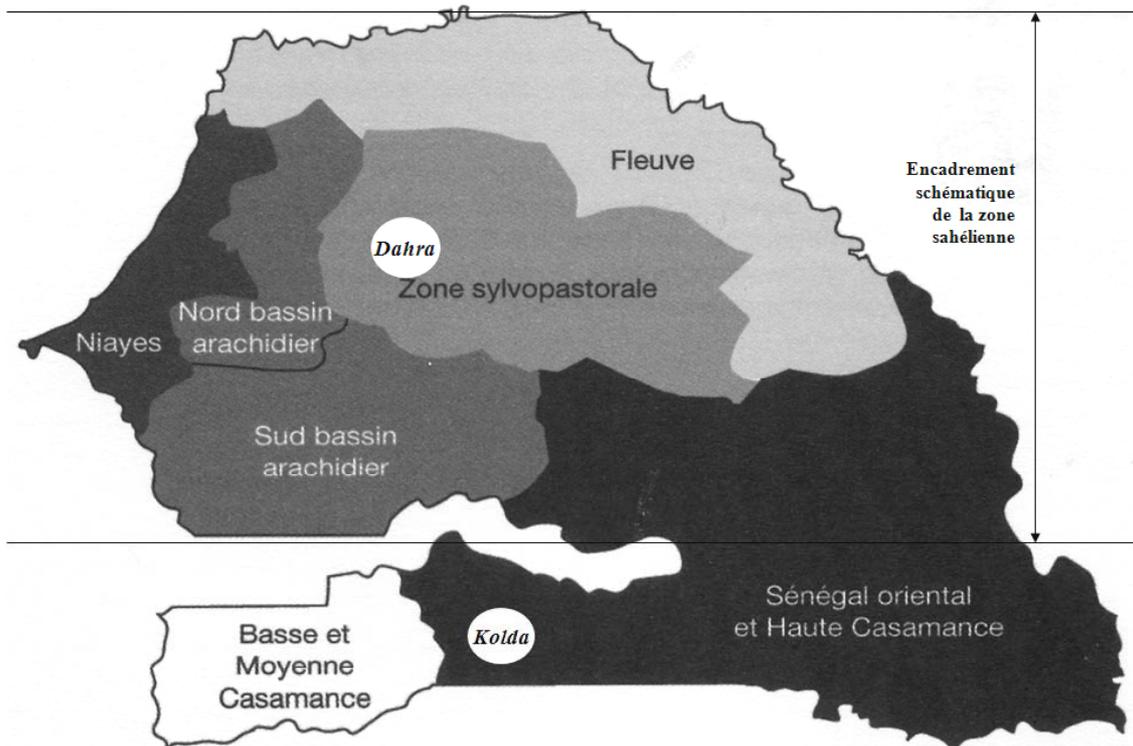


Figure 1. Localisation des régions de Dahra et Kolda sur la carte du Sénégal, et zonage agro-écologique normatif (d'après Guiro 2005).

3.3.2. La zone sahélienne semi-aride pastorale de Dahra. La région de Dahra est globalement pastorale. C'est une zone plus aride que la zone de Kolda (environ 300 mm/an). La saison des pluies est réduite entre juillet et septembre. Steppe graminéenne et savane arbustive composent la ressource de troupeaux de zébus Gobra. Les pratiques d'élevage diffèrent de celles au sud, en lien avec l'habitat et les ressources limitées. Les troupeaux évoluent entre les aires de campements des éleveurs transhumants et le forage, pouvant être éloigné de plus de 6 km. Le territoire de libre pâture est beaucoup plus vaste (30 km²). Dans un rayon assez large autour du forage, le piétinement des nombreux troupeaux laisse le sol nu. Les zébus ne sont pas parqués la nuit : il y a un pâturage nocturne.

Les observations réalisées au cours de cette thèse permettent de disposer d'éléments comparatifs avec les résultats obtenus dans la région de Kolda. Il s'agit d'aborder la question de la genericité de l'étude de modélisation conduite à Kolda à d'autres zones sèches.

4. PLAN DU MANUSCRIT

Pour présenter nos résultats concernant ce travail de modélisation du comportement spatial et alimentaire de bovins en libre pâture, nous procéderons en trois étapes : (1) décrire l'ingestion des bovins sur parcours en lien avec les couverts consommés aux cours des séquences de libre pâture au cours de la saison sèche afin d'intégrer ce processus à la modélisation, (2) décrire les circuits quotidiens des troupeaux et analyser l'effet des aménagements du parcours sur la construction et la modélisation de ces circuits, et enfin (3) intégrer les facteurs-clés des circuits et de l'ingestion dans un modèle de recherche à partir des conclusions prises dans les deux chapitres qui précèdent, afin de tester la pertinence de la représentation. A terme, un modèle prenant en compte les choix spatialisés des bovins et les processus d'ingestion doit permettre de lier les performances individuelles aux circuits quotidiens des troupeaux.

Chapitre 1 :

**Etude de l'Ingestion Alimentaire des Bovins en Libre Pâturage sur Territoires
Semi-arides Tropicaux à partir de Mesures Instantanées et Journalières**

Introduction : Situer et quantifier les prélèvements des bovins en libre pâture sur parcours tropical

1. CARACTERISER LES UNITES DE VEGETATION DE LA ZONE DE LIBRE PATURE

Au Sud, les troupeaux bovins sont en vaine pâture pendant 8 mois environ de l'année, durant la saison sèche après les récoltes (Kennedy 1995, Ickowicz and Mbaye 2001). Les animaux sont de fait autonomes dans leurs déplacements. La complémentation alimentaire n'est pas courante. En pratique, les éleveurs ne peuvent guère influencer sur les parcours des bovins pour une exploitation dirigée des pâturages naturels, à l'échelle des territoires.

Comme déjà dit dans l'introduction générale, vu l'analyse de la FAO sur les antagonismes entre faible productivité et besoins de production d'une part, et entre la valorisation des parcours par la mobilité des troupeaux et les impacts négatifs sur les sols, il semble urgent de développer des méthodes quantifiant les prélèvements et la charge des bovins sur le parcours afin de lier les circuits des troupeaux aux performances animales individuelles et à leur impact sur les sols. En zone sahélo-soudanienne, agropastorale (Fig. 1), nous avons suivi plusieurs troupeaux à trois périodes de saison sèche (cf. protocole des suivis, Annexe 5). En effet, l'analyse des suivis antérieurs relatés par Ickowicz et Mbaye (2001) montre une saisonnalité marquée du comportement alimentaire, au sein de la saison sèche.

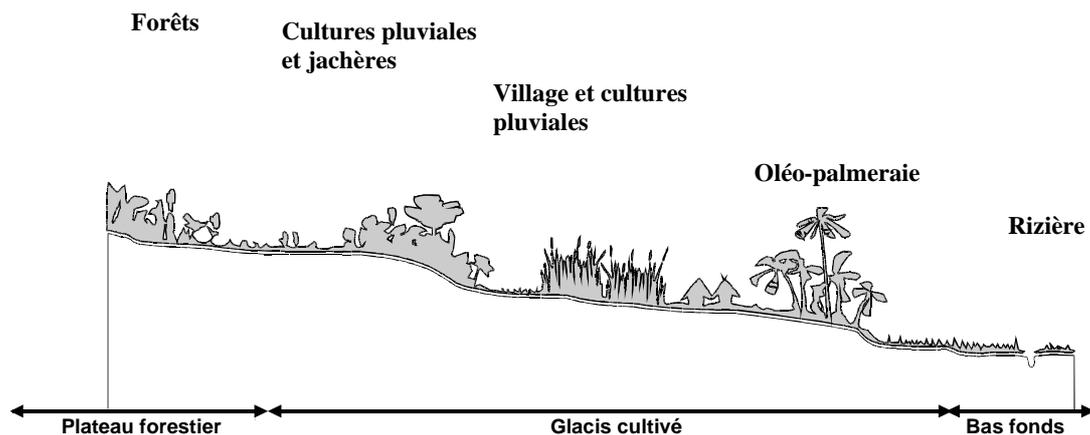


Figure 1. Toposéquence morphopédologique du terroir villageois de Saré Yoro Bana, sud du Sénégal. Ce profil est la maille type des paysages de Haute-Casamance (d'après Ickowicz et Mbaye, 2001).

Spatialiser sur le territoire et temporaliser dans la saison sèche les processus d'ingestion de nutriments sont nécessaires pour approcher les performances en milieu traditionnel, non contrôlé. Nous présentons d'abord les séquences des grandes unités de végétation traversées sur la Figure 2. Ces séquences diffèrent en fonction de la saison (début, milieu ou fin de saison sèche), telle qu'elle est définie dans l'article qui suit. Elles diffèrent également en fonction de la taille du troupeau. Sur les terroirs agropastoraux sahélo-soudaniens, les grands troupeaux (plus de 70 bêtes) ont généralement des modes de conduite et des circuits différents par rapport aux plus petits troupeaux. La zone d'étude principale, largement décrite dans l'article qui suit et dans celui du chapitre 2, est située dans la région de Kolda, en Haute-Casamance. Les bovins N'Dama sont en libre pâture en fin de la période que l'on a nommé début de saison sèche, jusqu'aux pluies, en fin de saison sèche, durant la journée. Ils sont à l'attache la nuit. Les ressources spontanées du parcours ont un développement phénologique faible et la majeure partie du stock herbacé est sénescant, tout au long de la saison sèche.

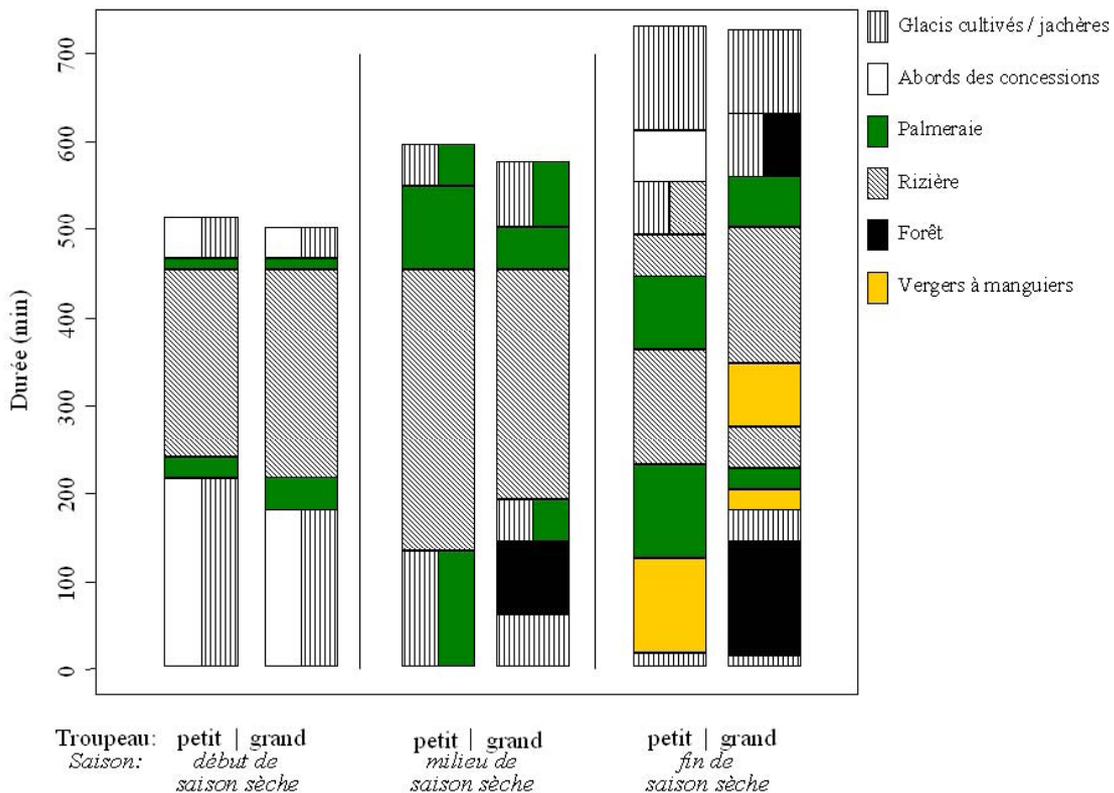


Figure 2. Séquences de végétation exploitées quotidiennement par des bovins N'Dama sur le territoire villageois de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal), au cours d'une saison sèche. Les circuits sont segmentés par taille des troupeaux et par période de saison sèche ($n = 10$ par catégorie). Les paliers sont les temps moyens de fréquentation. La rizière, à partir de l'ouverture des premières parcelles rizicoles totalement récoltées, a de plus en plus d'importance dans la journée de libre pâture des bovins, jusqu'en début de la période nommée fin de saison sèche.

2. DETERMINER LES COUVERTS CONSOMMES ET LES VITESSES D'INGESTION

La caractérisation des séquences des grandes unités de végétation est utile pour décrire l'occupation de l'espace au cours d'une journée de libre pâture. En fonction des temps de résidence des bovins sur une unité de végétation, ces séquences donnent une première information sur la localisation des prélèvements alimentaires. En outre, la caractérisation des séquences des grandes unités de végétation permet aussi de s'interroger sur les intérêts relatifs des animaux aux différentes unités de végétation. Par exemple, la rizière porte une ressource monospécifique de pailles de riz en début et milieu de saison sèche. Il a été démontré que la digestibilité des pailles de riz est élevée, relativement aux autres ressources spontanées du parcours : 56 % environ (INRA 1989, p. 332), et les biomasses disponibles à l'hectare sont également hautes : 2100 ± 1100 kg Matière Sèche /ha en début ($n = 106$), et 2100 ± 800 kg MS/ha en milieu de saison sèche ($n = 103$). Mais vu les différences d'intensités du pâturage des bovins N'Dama relativement mobiles sur le parcours, les grandes unités de végétation ne semblent pas suffisamment précises pour quantifier l'ingestion. En effet, selon la motivation à ingérer ou la vitesse de déplacement, deux séquences linéairement équivalentes dans le temps sur deux unités différentes ne seront de fait pas équivalentes en terme de quantités ingérées (Gibb et al. 1998).

2.1. Définition des couverts et méthode d'estimation des vitesses d'ingestion instantanées

Les vitesses d'ingestion instantanées renseignent sur le prélèvement très localisé dans le temps et l'espace des animaux sur le parcours. Ces vitesses sont mesurées sur des entités de végétation plus ou moins limitées dans l'espace. Il s'agit surtout d'une maille de végétation qui apparaît

homogène eu égard à la capacité d'un observateur de distinguer des vitesses d'ingestion significativement différentes, que le couvert soit mono ou plurispécifique.

Pour estimer les vitesses d'ingestion, nous utilisons la Collecte du berger. Cette méthode demande à un observateur de surveiller pendant un laps de temps très court (de quelques secondes à une minute) un ruminant en phase d'ingestion, jusqu'à ce qu'il avance pour continuer ses bouchées. L'observateur doit alors récolter la même poignée de végétation que l'animal vient d'ingérer. Cette méthode a un double inconvénient : l'observateur peut troubler les animaux et, en outre, il est source de biais des échantillons récoltés. Toutefois, c'est une méthode portable sur les terres de parcours, en Afrique sub-saharienne (Guérin et al. 1986, Babatounde et al. 2009).

2.2. Facteurs liés aux couverts et aux animaux devant influencer sur les vitesses d'ingestion

Il a déjà été montré que trois facteurs influent clairement sur les vitesses d'ingestion instantanées. (1) Vitesses d'ingestion et disponibilité de la biomasse sont théoriquement liées dans un modèle asymptotique, d'après le cadre d'analyse de la Réponse fonctionnelle (Ungar 1996, Bergman et al. 2001, van Langevelde et al. 2008). A l'échelle d'un couvert pâturé, il existerait un lien entre l'ingestion instantanée et l'état de la ressource végétale, principalement la biomasse, mais aussi le stade de développement ou le caractère épineux (van Langevelde et al. 2008). Conceptuellement, il semble y avoir un mécanisme compensatoire qui permet au ruminant de conserver un certain niveau d'ingestion lorsque les biomasses diminuent (Hodgson 1986, Koerth and Stuth 1991, Ginnett et al. 1999). La réponse fonctionnelle d'un ruminant sur un couvert pâturé correspondrait donc à un ajustement des vitesses d'ingestion instantanées à partir des biomasses, avec un seuil asymptotique. (2) La préhensibilité des espèces végétales semble influencer sur les vitesses d'ingestion, sur parcours tropical (Benvenuti et al. 2009), comme sur prairies tempérées (Prache and Peyraud 1997, Delagarde and O'Donovan 2005). Cela laisse supposer qu'un effet du couvert, mais aussi de la saison ou du troupeau pourra être mis en évidence, si les couverts consommés diffèrent en structure entre eux, et selon soit la saison, soit les circuits des troupeaux au sein d'une saison donnée. (3) Arithmétiquement, ces vitesses instantanées sont le produit de la masse des bouchées par la fréquence des bouchées. Il semble que la masse des bouchées soit déterminant sur la vitesse d'ingestion (Ginnett et al. 1999). Cela laisse supposer qu'un effet du format des animaux observés pourra être mis en évidence.

3. LIER LES PROCESSUS D'INGESTION INSTANTANES AUX QUANTITES INGEREES QUOTIDIENNES

Notre objectif est de modéliser le comportement alimentaire dans un modèle spatialisé où, par parcimonie, les quantités ingérées doivent émerger à partir de variables d'état du système implémenté. Même s'il n'est pas évident d'extrapoler les observations d'ingestion instantanée sur parcours car les ruminants sont capables de moduler leurs vitesses d'ingestion instantanées pour compenser les contraintes de temps total de pâturage quotidien, et ce malgré des propriétés du couvert constantes (Gibb et al. 1998, Boval et al. 2007), nous cherchons donc à lier les quantités ingérées quotidiennes aux vitesses d'ingestion instantanées.

Comme, logiquement, les niveaux d'ingestion quotidiens sont déterminés par les phases d'ingestion à court terme, pour lesquelles la théorie de la Réponse fonctionnelle prévoit qu'il est possible de lier ces vitesses d'ingestion aux biomasses disponibles, nous pourrions évaluer la potentialité de prédire les quantités ingérées quotidiennes à partir des biomasses fourragères disponibles.

Pour valider ces liaisons, il faut donc estimer par ailleurs les quantités ingérées quotidiennes des bovins N'Dama. Pour cela, deux méthodes sont aujourd'hui aisément réalisables sur des territoires traditionnels de libre pâture. (1) Des références de digestibilités des ressources consommées par les bovins tropicaux en zones sèches existent (INRA 1989). S'il est possible de déterminer les quantités de fèces excrétés quotidiennement, alors il est possible d'estimer les

quantités ingérées, comme somme de la fraction digestible et de la fraction indigestible (et excrétée) de la ration. Nous explicitons le protocole mis en place dans l'article qui suit. (2) L'analyse des spectres proche infra-rouge des fèces permet de prédire les quantités ingérées, lorsqu'une base de données de référence liant quantités ingérées mesurées et analyses spectrales des fèces existe au préalable, ce qui est le cas pour ces territoires sahéliens (Lecomte et al. 2003).

[Si intuitivement ce premier chapitre vient en second, il a été fait le choix de le présenter en premier. En effet, la logique de ces travaux est bien de décrire et de reconstruire par la modélisation les circuits quotidiens des troupeaux bovins en libre pâture. Cette étape réalisée (deuxième chapitre), nous pouvons alors spatialiser l'ingestion sur les circuits représentés pour ainsi avancer vers le lien entre circuits quotidiens des troupeaux et productions animales. Il faut donc étudier l'ingestion, ce que traite ce chapitre. Il peut être envisagé comme une étude autonome. Il est ré-intégré dans la démarche globale de cette thèse dans le dernier chapitre.]

Note de l'auteur

Feed Intake of Free-Ranging Cattle on Tropical Semi-arid Territories through Instantaneous and Daily Measurements

Guillaume Chirat,¹ Alexandre Ickowicz,² Samir Messad,³ François Bocquier⁴

Authors are ¹PhD student in livestock science, CIRAD & INRA, ERRC, Place P. Viala, 34060 Montpellier; ²Senior Research Scientist in livestock science, CIRAD, ERRC, Place P. Viala, 34060 Montpellier; ³Statistician in livestock science, CIRAD, TA C-18/A Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier; ⁴Professor in livestock science, Montpellier SupAgro, ERRC, Place P. Viala, 34060 Montpellier, France.

Abstract

The feed intake process analysis of free-ranging cattle on tropical semi-arid territories is a necessary step to quantify the contribution of distinct vegetation covers to cattle diets, and therefore to understand the links between daily circuits and animal performances. Our objective was to propose field methods for the simultaneous estimation of daily intake rates (DIR) and diet composition during daily circuits, and to describe instantaneous intake rates (IIR) related to vegetation covers types. We first recorded the feeding behavior of N'Dama cattle on a sub-arid agropastoral territory in the south of Senegal, during a full dry season. The dry season (DS) was divided into three parts: early- (EDS), mid- (MDS), and late dry season (LDS). DIR were estimated from faeces collected after night corralling of herds, through two methods: (1) an averaged dry matter (DM) digestibility of consumed covers and (2) a near infra-red spectral (NIRS) analysis of faeces samples. According to (1), DIR are decreasing along the dry season, and with the increasing scarcity of forage resources (EDS: 3.8, MDS: 3.6 and LDS: 2.8 kg DM/day). We also found that during the MDS there is a clear depletion of DIR in pregnant cows, which seems to be confounded with the animal frame size effect during EDS. Amplitude of these effects changed with seasons. According to (2), DIR values showed the same tendency that with (1) but variability was too small to conclude on environmental and animal factors' effects. We also measured IIR and adjusted them with total available forage biomass (Bm) on cover types. We adopted the Michaelis and Menten fitting model that allows validating hypotheses of the conventional Functional Response, i.e. with an asymptotic adjustment with non-limiting resource (IIRmax) and the threshold of Bm (K) where IIR is reduced by half. Hence we obtained IIRmax and K values for the main cover types. We found that small frame-sized N'Dama cattle accustomed to their specific environment have high IIR (highest IIRmax: 58 g DM/min) compared to temperate heavy breeds (43 to 63 g DM/min, on ray-grass swards). As expected IIR are particularly influenced by environmental factors ($P < 0.01$), i.e. vegetal covers, Bm and also by seasons. Models fitting IIR with Bm were proposed in order to estimate DIR from visited cover types along the daily circuits. In agropastoral systems, most of the cattle feeding activities are "grazing while walking". We therefore divided circuits into steady and non steady intake bouts in order to obtain a realistic uptake of plant material on each visited cover type. We thus propose a method to predict DIR by combining IIR with types of intake activities. Then we applied such methods on Gobra zebu on pastoral rangelands in northern Senegal. There, the only way to estimate DIR was through a NIRS analysis of faeces, because animals were not corralled and then browsed at night. We successfully developed Bm-IIR models and used the parameters to estimate DIR by combining them with feeding activities. As only diurnal feeding activities were recorded, predicted DIR represent a fraction of plant uptake. Our method, although not fully

Correspondence: Guillaume Chirat, INRA, CIRAD, Campus Montpellier SupAgro, 34060 Montpellier, France. Email: chirat@supagro.inra.fr

validated in this pastoral system, shows the necessity of estimating key parameters before being able to predict feed uptake from visited parts of a territory by free-ranging cattle. However, the present study proposes an original and operating approach to quantify the spatial feeding behavior of tropical free ranging cattle at the day-time scale along the dry season.

Resumen

Conocer el consumo de alimentos del ganado explotado en condiciones extensivas es un paso necesario en el objetivo de cuantificar la contribución de cada uno de los componentes de la cubierta vegetal que componen la dieta seleccionada por los animales en pastoreo así como para comprender la relación existente entre los circuitos diarios y el comportamiento animal. El objetivo del presente trabajo fue proponer un método de campo para efectuar estimaciones simultáneas de los ritmos de consumo diarios (DIR) y la composición de la dieta seleccionada. Primeramente, durante una época seca completa, se registraron los comportamientos alimenticio de un rebaño N'Dama en pastoreo libre en un territorio agropastoral sub-árido de Senegal. La época seca se divide en temprana (EDS), media (MDS) y tardía (LDS). La DIR se estimó a partir de la composición de las heces colectadas durante la noche en los establos en que pernoctaban los animales a partir de dos métodos: (1) la digestibilidad de la materia seca (DM) de las coberturas consumidas y (2) el análisis de las muestras de heces con la metodología del infrarrojo cercano (NIRS). De acuerdo a la digestibilidad (1), DIR disminuye a medida que avanza la sequía y, consigo, la escasez en la disponibilidad de alimentos (EDS: 3,8, MDS: 3,6 y LDS: 2,8 kg DM/día). Se constató que durante la MDS se produjo una clara reducción del DIR en las vacas gestantes, lo cual parece coincidir con lo que ocurre en EDS, aunque en este caso el efecto se confunde con la morfología de las hembras. La variación de estos efectos varió con la época. Los resultados del NIRS están de acuerdo con los encontrados en la digestibilidad, sin embargo la variabilidad fue demasiado pequeña para analizar otros efectos (p.ej. ambientales). Por otra parte, se midió los ritmos de consumo instantáneos (IIR) y se modelizó su relación con la disponibilidad total de biomasa (Bm) en los tipos de cubierta vegetal. Se adoptó el modelo de Michaelis y Menten el cual permite la validación de hipótesis a partir del Respuesta Funcional convencional, p.ej. ajuste asintótico con recursos no limitantes (IIRmax) y meseta de Bm (K) donde la IIR se reduce a la mitad. Los valores IIRmax y K se obtuvieron para las cubiertas vegetales principales. El ganado N'Dama de talla pequeña y bien aclimatado evidenció el mayor IIR (58 g DM/min) cuando se comparó a las razas más pesadas de clima templado (43-63 g DM/min en pastoreo de ray-grass). De acuerdo a lo esperado, el IIR es determinado ($P < 0.01$) por factores ambientales como la cubierta vegetal, la Bm y la época. Entre los factores ambientales que afectan DIR, la talla es el más significativo ($P < 0.01$). Los DIR fueron también estimados a partir de la modelización de los ajustes de IIR con Bm. Debido a que las actividades de pastoreo (y por tanto de consumo) se producen con los animales en movimiento, los circuitos se dividieron en estáticos y no estáticos para obtener una apreciación más realista. Se propone un método para predecir DIR mediante la combinación de IIR con las actividades de consumo el cual se aplicó a un rebaño de vacuno Cebú (Gobra) en pastoreo en el norte de Senegal. En este caso, la única forma de estimar DIR es a través del análisis NIRS con las muestras de excreta recolectadas, debido a que los animales no pernoctan en naves de estabulación. Modelos Bm-IIR (y su combinación con las actividades de alimentación) fueron desarrollados y sus parámetros usados para estimar DIR. Debido a que se registraron sólo las actividades diurnas, los DIR predictados representan una parte de las plantas consumidas. Este método, aunque aún sin validar completamente en el sistema pastoral, muestra que hay una necesidad de calibrar numerosos factores antes de ser capaces de efectuar predicciones robustas. Sin embargo, el presente estudio propone un enfoque original del comportamiento alimenticio espacial en ganado vacuno tropical en libre pastoreo, a la escala de la actividad diurna y durante la época seca.

Key words: free-ranging cattle, intake rates, functional response, semi-arid rangelands, field methods, NIRS

INTRODUCTION

Most of domestic herbivores are bred in developing countries. In Africa, except some intensive breeding system around urban centers, this activity remains rural. The rainfed mixed farming system associates an annual crop production during the rainy season with livestock activities based on pastoralism. This so called agropastoral system has the most important number of ruminants and the highest beef meat contribution (Sere et al. 1995). Pastoralism remains a structuring activity of semi-arid rural territories (Rodriguez 2008). However, it has always been in between of an environmental contradiction: pastoralism has to be more productive to contribute to the supply of an increasing demand and besides, it is pointed out to contribute to rangelands and environmental damages (Steinfeld et al. 2006). Assessments of ruminants' performances together with their environmental impact on rangeland imply to deal with the spatialized feeding behavior of the free-ranging cattle. This requires pastoral resource description, circuits study, and feed intake estimation on rangeland. We previously studied and modeled daily circuits of free ranging cattle on an agropastoral tropical territory (Chirat et al. submitted). The aim of this paper is to focus on intake processes on rangeland during daily circuits. Integrating these cattle intake processes in a model of spatialized feeding behavior may allow to simulate dynamics of animal performances and their impact on resources. Animal performances in harsh environments have been studied through animal productive potentials (Bosso et al. 2009), through its effect on the body condition dynamics (Ezanno et al. 2005), and also through feed supplementation trials (Sidibé-Anago et al. 2008). However, in an analytical approach (Le Moigne 1977, Walliser 1977, Le Moigne 1990, Ferber 1995), we consider that ruminants performances should emerge from intake estimations. Thus, we need methods and reference values to estimate intake directly from the field, i.e. on rangelands where cattle most often graze free. To our opinion this is an innovative way to improve on animal husbandries, rangeland management and breeding practices in tropical areas where researchers and managers cannot easily get controlled experimental conditions. We first present results on daily intake rates (DIR), estimated from daily excreted faecal quantities through two complementary methods during dry season on rangelands of West Africa. Secondly, as these animals are continuously moving during the day, we analyzed the instantaneous intake rates (IIR) measured on different types of resources, along cattle daily circuits during dry season. We finish off our reasoning by linking DIR and IIR in order to propose a new method of DIR estimation from IIR and associated variables. We also attempt to validate these methods with data obtained in two distinct ecosystems, namely pastoral sahelian and agropastoral soudanian part of Senegal.

1. MATERIALS AND METHODS

1.1. Studied area, south of Senegal

We worked on N'Dama cattle herds in the village territory of Sare Yoro Bana (lat 12°49'N, long 14°53'W), in the Kolda region, Casamance, south of Senegal (Fig. 1). This region is located at the southern limit of Sahel, which is the semi-arid belt of vegetation transition between Sahara and soudanian rangelands (Rietkerk et al. 1996). The climate of the study area is rather sub arid (Sere et al. 1995) with an average rainfall of about 1 000 mm/year. Trypanotolerant N'Dama cattle (*Bos taurus*) are about 250 kg live weight (LW). The agropastoral territory is made of a mosaic of forest and savanna on the plateau, of savanna and crop fields on the glaciais and by the rainfed rice fields in the lowlands. At the village territory scale, land use is organized in rings around the households, permanent crops for the closest, fallows, forest and rangeland outside. This pattern is

repeated in all upper Casamance. N'Dama cattle range totally free from beginning of January to mid June. During other months, animals are herded farther from the village and the cropped area. Indeed, Peulh breeders cultivate food-producing crops (millet, maize, sorghum and rice) and cash crops (cotton, groundnuts).

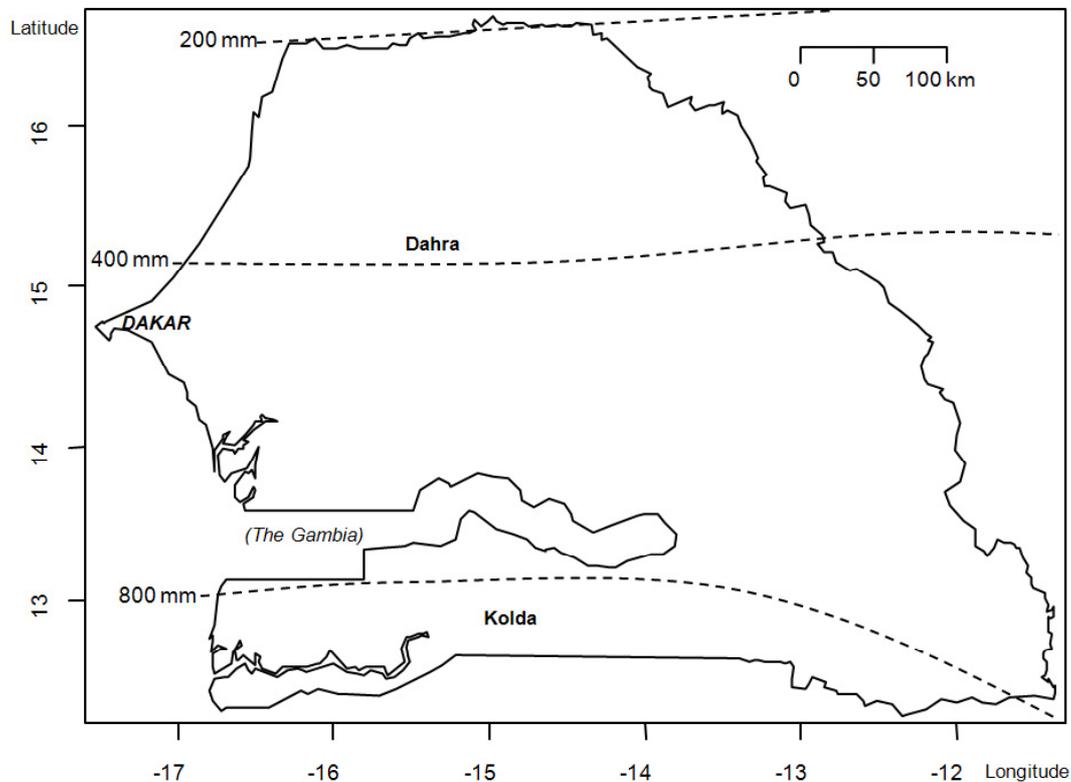


Figure 1. Senegal map. Dakar is the capital city. Kolda is located in the sub-arid part, south of the 800 mm-rainfall limit. Dahra is in the semi-arid part, between the 200 and the 400 mm isohyets.

The year is divided in two seasons: the dry season, DS (from late October to early June) and the rainy season, RS (June to September). Average minimal and maximal temperatures are respectively about $T_{\min} = 19$ and $T_{\max} = 37^{\circ}\text{C}$ in DS and 24 and 33°C in RS. A thinner division of the year is however necessary to analyze livestock management. Regarding our field conditions and previous published literature (Schlecht et al. 2006), we set four bouts of a year: the early dry season (EDS) from mid October to end of December, which corresponds to the come back of cattle herders on fields already harvested, the mid dry season (MDS) from January, start of the full free-ranging, to the beginning of March, when the rice straws left on the rice fields have almost been fully consumed, and lastly the late dry season (LDS) which is the warmest bout until mid June when rains start. Hence, EDS, MDS and LDS are included in DS.

During DS, animals spend nights individually tied-up on a part of a field, so called night park. Night parks practice allows to protect and milk animals, it also allows to manure fields. The frequency of changing parks' locations is generally of about every three weeks. Each day, herds leave the park in the morning, reach a watering point around mid-day, a well or water in the lowland, then range back to the park before mooring. In between, they walk and intake through many vegetation units, like cropped fields, grass pastures or parts of the forest. Daily path and activities of two observed herds were recorded continuously in order to describe spatial and feeding behaviour (Chirat et al. submitted). In this paper we present results from intake rates observations.

1.2. Estimations of daily intake rates from faeces quantities

1.2.1. Arithmetical relation between daily intake rates and faeces quantities. Daily intake rates (DIR, in kg of Dry Matter/day) and daily faeces quantities (FQ in kg DM/d) are connected through the equation:

$$FQ = DIR \times (1 - Dig) \quad [1]$$

where Dig is the dry matter digestibility of the diet. It is then theoretically possible to calculate DIR from FQ collection, under the hypothesis of a reliable determination of Dig. On the field however, it is difficult to collect faeces when cattle range. If cattle are tied up at night, as it was the case in Sare Yoro Bana, we can collect faeces for this bout. We then searched for a method to approach DIR from partially collected faeces.

To collect faeces in the night park, plastic covers were installed in order to prevent from soil contaminations. Animals were tied up in a way they could not reach one to another. Dungs of an individual were then easily identifiable. In the morning, during the milking, just before cattle leave, observers weighed the faeces collected around a given animal. A steelyard 1 kg-graduated until 20 kg was used. Dungs were put in a clean plastified bag, of about 100 g. This bias is controled and measured weights are done with a 0.5 kg precision. Then a sample of the total mass is taken and weighed thanks to another steelyard graduated until 1 000 g. Precision of the measure was given at 10 g. Samples are dried in an oven with a constant temperature (65 °C) during 48 h in order to obtain materials perfectly dried. Dry samples were weighed. The dry matter of the corresponding original total mass was finally estimated proportionally.

Dig estimations were segmented according to season: EDS, MDS and LDS. In our case, Dig are predicted by equations from in vivo digestibility trials carried out with feeds from different senegalese rangelands, given to Peul-Peul sheep (Guérin et al. 1989, Guérin et al. 1990). These equations relate faeces chemical composition to diet Dig. With a total number of 76 faeces samples we averaged Dig per seasons, 24 in EDS, 20 in MDS and 32 in LDS. To determine DIR from FQ, a simple method was suggested from an hypothesis based on qualitative observations on the field: faecal excretion is a continuous process (Manlay et al. 2004). Hence, the ratio of faeces collected in the night park on FQ is equivalent to the time spent in the park per 24 h:

$$\frac{\text{Faeces from night park}}{FQ} = \frac{\text{Time spent in night park}}{24} \quad [2]$$

We tested this hypothesis thanks to faecal excretion data of 267 bulls, on one year. Bulls are tied up with cows, at night. Excreted faecal quantities are also known during the night park time. Unlike cows, because of no dilution by urine, bulls were kitted out with bags in order to collect faeces excreted during the free ranging. Altogether we had distinct values of the night and day faecal emission. We compared, for each bull, DIR calculated in [1] either with FQ as a sum of total faeces weighed on 24 h, or estimated only from faeces collected on the night park, through [2]. Distributions of DIR calculated through both methods were almost normal. We used a Student's *t*-test and Bartlett's test in order to verify respectively the homogeneity of means and variances. We then could verify whether the two normally distributed populations were equal.

This preliminary result is shown below in the section "Analysis of DIR estimated from faeces quantities and digestibility". As we propose a correction, we tried to decide whether the same correction of DIR calculated from excreted faeces in the night park, determined with bulls, may be conveniently applied to cows. We compared the excreted faeces in the night park of the 267 bulls with those of 742 cows, on variance and mean of both normally distributed populations. We showed that the two populations are equivalent regarding this criterion. We then consider that we can apply the DIR correction elaborated with bulls on 335 DIR of cows which daily and instantaneous intake rates were observed during the dry season (DS). Two herds were selected: a large (about 90 animals among which about 60 mature cows) and a small herd (about 30 animals

among which about 20 mature cows). A sample of twelve cows per herd was determined, on physiological state (i.e. pregnant or not) and frame size criteria which might have impact on intake rates. The twelve cows branded per herd were mature, i.e. primipareous or multipareous. So each class, small x pregnant, small x non-pregnant, large x pregnant, large x non-pregnant, included three individuals. The physiological state criterion was determined with the breeder so that it can be assumed that cows were close to calving. As a consequence we can assume a large difference in nutrient requirement between empty and pregnant cows. Each herd was studied during five days spread on three weeks, in EDS, MDS and LDS. During a day, dungs of each night were collected for DIR calculation and instantaneous intake rates (IIR, in g DM/min) were estimated too, along the herd's circuit (see below).

1.2.2. Estimation of daily intake rates through the spectral analysis of faeces. Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) is based on the selective absorption of infrared beams (800 – 2 500 nm) by the different constituents of the organic matter. This technic is time-efficient, cheap and non-destructive. NIRS can give estimates on constituents of the daily diet from calibrated models : dry matter, mineral matter, neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) and acid detergent lignine (ADL) and these parameters may be convenient to estimate DIR (Garnsworthy and Unal 2004, Fanchone et al. 2007, Decruyenaere et al. 2009).

During a previous program studying the feeding systems in Senegal, researchers carried out digestibility trials on 125 small ruminants and 11 zebus. 73 meals were composed of by-products from local agriculture (e.g. millet and maize bran, rice straws), 57 meals were mixed diets including forages from rangeland, and 7 meals were single-distributed plants. Direct observations and SPIR analysis allowed to evaluate DIR, in kg DM per kg of metabolic weight (Lecomte et al. 2003). P. Lecomte predicted DIR for cattle thanks to specific equations settled from comparison between DIR of small ruminants and of zebu in the senegalese field, and from previous equations formalized by the national institute of the agronomic research (INRA 1987, p. 36). We then had access to DIR predictions from the faecal indexes for our 290 samples from the Kolda region which were milled (particles diameter < 1 mm), then scanned with NIRS method in the CIRAD laboratory in Montpellier.

1.3. Estimation of instantaneous intake rates on rangeland

1.3.1. Adjusting instantaneous intake rates on available biomasses with a biological model. A major constraint to livestock performances in semi-arid tropical regions is inadequate nutrition because rangeland and crop residues are bulky, high in fibre, low in nitrogen and of poor quality (Ngodigha and Oji 2009). Knowledge of an average diet quality and DIR allows to stress such a fact. However, it is not sufficient to study free-ranging cattle performances in heterogeneous environments. In this objective, we assume it is necessary to know selected feeds and instantaneous intake rates (IIR). Such operations require studying daily circuits, through DIR but also through vegetation and facilities uses too. We previously presented our results on daily circuits descriptions (Chirat et al. submitted). Studying daily vegetation use patterns and diet is complementary with IIR, at the patch scale, in the sense of Bailey et al. (1996).

The functional response concept (Ungar 1996) ensues from the variety of scales herbivores respond to (Bailey et al. 1996). That is a theoretical frame analysis of the feeding behavior at small vegetation scales (not more than a patch). More precisely, that is the connections between IIR and the vegetation state, mainly through biomass (Bm, in kg DM/ha), also called "conventional functional response" (van Langevelde et al. 2008), but also through plants traits like growth forms and spinescence. IIR can be defined arithmetically as the multiplication of the bite mass by the bite rate. Conceptually, it seems to exist a compensatory mechanism permitting to keep a certain level of IIR. Hence, with decreasing Bm, herbivores may compensate the reducing bite mass by increasing the bite rate (Hodgson 1986, Koerth and Stuth 1991, Ginnett et al. 1999). IIR are generally determined on artificial microswards with homogeneous or heterogeneous cover, or with branches for ligneous material, inspected before

and after consumption by an animal, in standardized conditions. It allows measuring bite masses and rates. IIR are often studied to analyse correlations with plants characteristics, e.g. available Bm, morphology, quality (Distel et al. 1995, Ginnett et al. 1999, Drescher et al. 2006a, Benvenuti et al. 2008, van Langevelde et al. 2008). IIR can be studied moreover to compare the intake efficiency of two or more animal species co-existing in the same habitat (Haschick and Kerley 1997). As far as we know, it might be hardly impossible to find studies where authors try to evaluate IIR directly on the field, because of the observations complexity. However, this transition from the experimental station to the field appears necessary to elaborate methods facilitating the determination of intake quantities or efficiencies in rangelands.

In our case, we analysed the potential connection between IIR and Bm. We began with this assumption: representing the conventional functional response requires a model with an asymptotical threshold (Ungar 1996). Some authors, as Bergman et al. (2001) working on bison in an experimental station, use a Michaelis-Menten formalization. Nevertheless, van Langevelde et al. (2008) however stressed this fitting model is valuable only if one feed type (e.g. one homogeneous cover) is represented. Indeed, they show that variations of the cover quality induce a deflection of the response curve adjusting IIR to Bm. Parameters of the Michaelis-Mentel model have a biological sense:

$$\text{IIR} = \text{Bm} \times \frac{\text{IIRm}}{\text{Bm} \times K} \quad [3]$$

with IIRm the asymptote, i.e. maximal IIR, and K the Bm corresponding to IIR equal to half the IIRm.

1.3.2. Observation method. During previous campaigns, observers followed regularly herds on the range. Each 5 min, they collected the same vegetal species as taken by an animal (the closest), paying attention to respect proportions when the cover was heterogeneous. This so called Shepherd's collect (Guérin et al. 1986) permits to approach the diet composition of cattle along a circuit. For our purpose of measuring IIR function of Bm, we then determined IIR with an adaptation of the Shepherd's collect method. An observer close to a familiarized branded animal looks at the bites of this individual and try to assess the intaken quantity of the consumed cover. Then, the observer repeats what he just had seen, close on the same cover and identifies the sample statement. As the method is strongly by rules of thumb, two observers take it in turns. This should attenuate the observer-based bias. Hence we consider that there is independancy between the successive observations, daily and per animal. We measured 679 IIR during DS 2008. Studied factors of variability are herd (which include herd size and circuits), cow physiological state and frame size. We also determined total ground Bm and bite rates at each spot of IIR assessment. One assistant did two plotting of one quarter of square meter, in the case of an herbaceous or litter cover, on the same cover but excluding previous takings. For ligneous species, instead of total Bm determination, we preferred to evaluate Bm available for the animals. Indeed, linking total Bm of leaves on a tree sets a feasibility problem and may not have sense. Available ligneous Bm was estimated as the total matter quantity of the shrub or the twig accessible to the observed animal. The cover type was also recorded (maize cane, millet leaves, gramineous straws and so on). Besides, the observer counts the bite rates during one minute and repeats this operation from one to three times once he has estimated IIR, depending on the feasibility. Indeed, the free-ranging system is often a walking system. Animals are very mobile on the territory. Hence observers carry out a statement when a visible animal is steady (i.e. non-moving for several minutes) or not.

1.3.3. Relation between instantaneous intake rates and the other measured factors. The adjustment of our data through the non-linear regression of the Michaelis-Menten model was undertaken under the software R (R Development Core Team 2009). In order to test relative effects of all measured factors (Bm, season, vegetal cover, so called environmental factors, then

herd circuit, and finally animal physiological state and frame size, so called animal factors), we used successive linear regressions, adding or deleting one factor at each step, starting with a model combining all factors with interactions, and we determined the Akaike Information Criterion (*AIC*) of those linear model, in order to evaluate which factors are of prime importance in the variance of IIR. *AIC* is a tradeoff between goodness of fit and parsimony. The best model is the one with the lowest *AIC* (Burnham and Anderson 2002, Ezanno et al. 2005). The selected model, thanks to the *AIC*, is not necessarily optimal, but allows discussing the influence of the factors on the IIR variability.

1.4. Relation between instantaneous and daily intake rates

DIR ensues from IIR, but the arithmetical link is not that simple. IIR we estimated are snapshots of ingestive behavior, and are not sufficient *per se* to explain the dynamics of grazing process over a day period (Agreil et al. 2006) and then DIR. Moreover, animals were relatively steady when observed what led us to overestimate DIR if calculated from the sum of those observed IIR during the daily circuit. As during each studied circuits, ten per season, we noted precisely the activity, grazing (or browsing) while walking, walking without grazing, and resting. Hence, we assessed whether cattle grazed with a relative stability or not. Grazing is considered as steady if the herd does not move for few minutes. Finally, we registered the sequence of vegetation units visited and the cover type consumed. We then built a database which allows solving the following equation:

$$DIR_{(season)} = C_{st} \times \sum_i (IIR_{(cover\ season)} \times t_{st})_{i=graz.st} + C_{nSt} \times \sum_i (IIR_{(cover\ season)} \times t_{nSt})_{i=graz.nSt} \quad [4]$$

with C_{st} and C_{nSt} the regression coefficients respectively for the factor “steady” ($_{st}$) and “non-steady” ($_{nSt}$). For the grazing bout determined as steady, on a i^{th} cover type, IIR evaluated for this cover type is multiplied by the bout duration t_{st} . Else, IIR evaluated for the cover type is multiplied by the bout duration t_{nSt} . The normally-distributed DIR calculated values were averaged per season. The IIR values were therefore segmented per season and per cover type. We choose in [4] to use the median values, per season and cover type, regarding their high variability and the different distributions per category.

1.5. Evaluation of the agropastoral territory methods in a sahelian pastoral rangeland context

We drove observations on Gobra zebus (*Bos indicus*), during MDS and LDS, in the village of Widou Thiengoly (lat 15°20’N, long 15°26’W), in the Dahra region (Fig. 1), border between Djolof and Ferlo, in northern Senegal. Whereas the Kolda region is a sahelo-soudanian agropastoral territory, the Dahra region is sahelian, pastoral. In this region of steppe and arbustive savannas, cattle are not tied up at night and there is a night-grazing. That induced we were not able to measure FQ nor to estimate DIR under hypothesis of Dig. However, we collected 45 dungs not contaminated with sand in the rangeland in LDS, but not in MDS. These faeces were analysed with NIRS.

Besides, we have 261 IIR in MDS and 80 IIR in LDS, with corresponding Bm. The same methods were applied to obtain the variables. Circuits of both herds (small and large) were described too, so that we know vegetation sequences and grazing while walking durations. We also tested the method with Michaelis-Menten models elaborated from the Kolda region, comparing IIR predicted by the models using Bm, with observed IIR. Moreover, we discuss DIR estimates thanks to equation [4], from observed IIR. We compare these DIR with those estimated through NIRS and those found in the literature.

2. RESULTS

2.1. Estimations of daily intake rates from faeces collected in the agropastoral Kolda region

2.1.1. Analysis of daily intake rates estimated from faeces quantities (DIRfq) and diet digestibility. Estimations of the diet dry matter digestibility (Dig) were segmented regarding the season. Dig is equal to 53% in EDS ($n = 24$), 51% in MDS ($n = 20$) and 50% in LDS ($n = 32$). We know the total faeces (FQ) excreted by 267 bulls. For each bull, we calculated DIRfq with equation [1] using directly FQ or with equation [2] estimating FQ from the dungs excreted in the night park. Results are significantly different (Bartlett’s test: $P < 0.001$, paired two-sample Student’s test with heterocedasticity: $P < 0.001$). That is to say we reject the hypothesis of continuous faecal excretion. The quantile-quantile plot of the two DIR populations revealed an over-valuation of DIR from collected night-faeces. Error is not constant (see [5]): for instance, an intake level estimation of 4 kg DM/d from night-faeces should be corrected to be equal to 3.5 kg DM/d. All the same, as we need to predict DIR from night-faeces, we corrected DIR estimated with equation [2] by DIR estimated directly with FQ. We chose to apply a linear model to fit the indirectly estimated DIR function of directly-estimated DIR. An ANOVA indicates that the quadratic model has the best fitness ($r = +0.80$), and graphically the model curve is almost superimposed on the smoothing curve of the xy-plot by the “loess” method, i.e. a local polynomial regression fitting using the least-squares (see Cleveland et al. 1992, p. 309). The adjustment equation (in kg DM/d) is:

$$\text{indirect DIR} = -0.027 \times \text{direct DIR}^2 + 0.79 \times \text{direct DIR} + 0.80 \quad [5]$$

As we work on cows, we verified if this correction elaborated from the bulls’ data could be convenient for the females’ data. The comparison between the two populations of faeces excreted in the night park by bulls ($n = 267$) and cows ($n = 742$) for a previous campaign indicates that these faeces quantities are equivalent: Bartlett’s test is non significant ($P = 0.61$), as Student’s test ($P = 0.92$). Regarding these results and the equivalent frame sizes of cows and observed bulls, we assumed that the correction can be extrapolated to all individuals. We then applied the correction on our sample of cows observed in 2008. Table 1 shows DIR segmented by season

Table 1. Summary of cows daily intake rates in the sahelo-soudanien agropastoral territory (south of Senegal). DIR, in kg of dry matter, are segmented according to seasons: early, mid and late dry season (respectively EDS, MDS and LDS). First line of one given season indicates DIR estimated from faeces quantities and dry matter digestibility (DIRfq, equation [1]). Second line indicates DIR estimated from faecal indexes predicted through NIRS (DIRni). The class ‘distances’ gives the average distance (arbitrary unit) of the NIRS-tested faecal samples to reference data.

season	DIR	mean	mini	1st quartile	median	3rd quartile	maxi	distances
EDS	DIRfq ($n = 120$)	3.8	1.8	3.1	3.6	4.4	5.9	-
	DIRni ($n = 91$)	3.8	3.3	3.7	3.8	3.9	4.2	5.9
MDS	DIRfq ($n = 111$)	3.6	1.5	2.9	3.7	4.1	6.3	-
	DiRni ($n = 97$)	4.0	3.8	3.9	4.0	4.1	4.4	10.0
LDS	DIRfq ($n = 104$)	2.8	1.1	2.2	2.7	3.1	5.6	-
	DIRni ($n = 94$)	4.5	4.1	4.3	4.4	4.6	5.8	14.2

We begin to analyse DIRfq. The number of observations (n) per season is not constant because it happened that cows escaped from the night park. DIRfq of EDS and MDS are not significantly different, in terms of variance ($P = 0.56$) and of distance to the mean-value ($P = 0.11$), but DIRfq during LDS are significantly lower (Student’s test: $P < 0.001$). Table 2 presents the factors with their modalities, affecting potentially DIRfq: herd (size and the different circuits),

pregnancy (cow pregnant or not) and frame size (tall or small cow), with eventual interactions between these factors.

Table 2. Significance (*F*-test) of the linear model factors (first column) fitting undirectly-estimated daily intake rates of cows (DIRfq), in a sahelo-soudanian agropastoral territory. Data were dispatched into parts of the dry season: early (EDS), mid (MDS) and late dry season (LDS). Average DIRfq (*m*) are precised per season. DIRfq are also noted when a factor influence significantly on the intake level, from the reference DIR-value *m*.

Factor	Modality	Season		
		EDS (<i>n</i> = 120) <i>m</i> = 3.8 (±0.9) kg DM/d	MDS (<i>n</i> = 111) <i>m</i> = 3.6 (±0.9) kg DM/d	LDS (<i>n</i> = 104) <i>m</i> = 2.8 (±0.8) kg DM/d
Herd	largeH smallH	- <i>ns</i>	- <i>ns</i>	2.9 (±0.2) <i>P</i> = 2.7 (±0.2) 0.107
Pregnancy	pregnant non-pregnant	3.6 (±0.2) <i>P</i> = 3.9 (±0.2) 0.056	3.3 (±0.2) <i>P</i> = 3.8 (±0.2) 0.002	- <i>ns</i>
Frame size	small tall	3.9 (±0.2) <i>P</i> = 3.6 (±0.2) 0.088	- <i>ns</i>	- <i>ns</i>
Pregnancy x Frame size	pregnant x small pregnant x tall non-pregnant x small non-pregnant x tall	3.7 (±0.3) 3.5 (±0.3) <i>P</i> = 3.6 (±0.3) 0.007 4.3 (±0.3)	- <i>ns</i>	- <i>ns</i>
Herd x Frame size	largeH x small largeH x tall smallH x small smallH x tall	- <i>ns</i>	- <i>ns</i>	- <i>ns</i>
Herd x Pregnancy	largeH x pregnant largeH x non-pregnant smallH x pregnant smallH x non-pregnant	- <i>ns</i>	3.6 (±0.3) 3.8 (±0.3) <i>P</i> = 2.9 (±0.4) 0.036 3.8 (±0.3)	- <i>ns</i>

In EDS and MDS, we found a clear depressive effect of pregnancy on DIRfq (Tab. 2), for both herds. In EDS, this effect is particularly confounded with the frame size effect. In MDS, the pregnancy effect is more effective in smaller herd than in larger. The herd size effect may be however confounded with circuits. Statistically, these circuits may be equivalent for DIRfq. In LDS, however, due to the lack of forages, circuits between both herds might have not been equivalent. We did not find any other effect of interactions nor other factors: distinct circuits should have a large impact on intake levels, in LDS.

2.1.2. Estimations of daily intake rates from NIRS. From faecal NIRS indexes, cattle DIRni were estimated. Results are summarized in Table 1 (second line per season). The column so called “distances” indicates that samples from EDS, with the smaller distance (5.9) to a reference database, should be better predicted. While for others samples collected in MDS (10.0) and in LDS (14.2) there is an increasing distance from this reference database. Hence, it is to note that DIRni predicted in EDS are very satisfactory (3.8 kg DM/d), while there is a tendency toward higher estimates of DIRni with seasons through the NIRS method: + 0.4 kg DM/d in MDS and + 1.7 kg DM/d in LDS. Although samples numbers were of similar magnitude (around 100 samples) the NIRS method gives less variable values than faeces collection method.

2.2. Analysis of instantaneous intake rates related to available biomass in the agropastoral territory

2.2.1. Vegetation covers description. Cattle were followed each day from leaving the night park to mooring. Vegetation sequences of circuits were recorded. Instantaneous intake rates (IIR) statements were done according to the feasibility but we were careful in representing all distinct covers where animals have been observed. We then have IIR informations on all consumed covers. We detail the consumed covers below, according to seasons. Then, we aggregate those data into some major cover types.

In EDS, cattle graze essentially crop residues on harvested fields. Millet fields encompassed palatable but limited materials, i.e. leaves and some ears, and canes like on maize and sorghum fields. Parts of the rice field which already have been harvested are visited too, cattle feeding rice straws. On the groundnut fields grows spontaneous vegetation with green regrowth of plants mixed with dry materials, but without groundnut hays. These hays are harvested for commercial use or as supplementation feed for other animals. In the palmgrove, cattle spend short bouts in a dense vegetation of green grass (identified as *Pennisetum pedicellatum*, *Digitaria horizontalis*, *Brachiaria mutica*, *Rottboellia sp.*, *Cynodon sp.*, *Paspalum sp.*), and leguminous species (identified as *Stylosanthes sp.*, *Alysicarpus sp.*, *Calopogonium sp.*). In other spontaneous vegetation units, like fallows and savannas, cattle consume various straws (identified as *Andropogon pseudapricus*, *Andropogon gayanus*, *Pennisetum pedicellatum*) and litter that we define as ligneous materials (leaves or senescent fruits) mixed with straws. In EDS, ligneous materials are pods of *Prosopis africana* or leaves of Baobab (*Adansonia digitata*).

In MDS, herds spend most of their time on rice fields eating straws. On other harvested areas remain canes of millet, sorghum and maize. On fallows or savannas we find the same type of grass straws. Ligneous materials of litter encompass more ligneous species: fruits of *Daniellia oliveri*, pods of *Prosopis africana*, flowers of *Bombax costatum*, and inflorescence of *Cola cordifolia*, mainly. In the palmgrove, cattle spend short bouts at the end of the circuit on grass with maturing stems. Leguminous species look almost disappeared. The larger herd passes besides on the forest resources. At this season, cattle feed mainly on various straws and litter.

In LDS, finally, biomasses are scarcer. On the rice field, rice straws are almost completely consumed, some patches remain, and the principal cover is made of short regrowths of grass (identified as, mainly, *Cynodon sp.*, *Digitaria horizontalis*). Cattle keep walking through harvested crop fields where canes still lie. On fallows or savannas, various grass straws are still fed. There is almost no more litter consumed. The larger herd passes daily through the forest where twigs are browsed. Ligneous species were identified: *Pterocarpus erinaceus*, *Combretum nigricans*, *Combretum glutinosum*, *Securidaca longepedunculata*, *Strychnos spinosa*, *Khaya senegalensis*, *Grewia lasiodiscus*, *Baissea multiflora*, *Prosopis africana*, and *Holarrhena floribunda* (branch without leaves). Fruits are also available under *Cola cordifolia*, *Sclerocarya birrea*, *Parkia biglobosa*, mango tree (*Mangifera indica L.*) and cashew tree (*Anacardium occidentale*).

To summarize, we observed 12 distinct covers fed along the dry season (DS): (1) rice straws, (2) various grass straws and (3) canes (sorghum, millet, maize), that exist all along DS. (4) There is litter in EDS and MDS. Then, specific to some season, we found (5) mixed vegetation on groundnut fields, (6) millet, maize and sorghum leaves, (7) millet ears on millet field, (8) dense grass and leguminous species in the palmgrove in EDS, (9) grass with maturing stems in the palmgrove in MDS, (10) short regrowths of grass in the rice field, (11) twigs in forests and (12) senescent fruits in LDS.

2.2.2. Adjustment of instantaneous intake rates with Michaelis-Menten models.

According to the functional response theoretical framework, we chose the Michaelis-Menten formalization. For cover types available only during one season, we assume that the snapshot is short enough to consider them as homogeneous in quality. For the other types of covers that maintained available along DS, we set the hypothesis that these dry materials have a constant

quality since they are dry. That is why we first present the analysis of relation between IIR and Bm per cover type (Fig. 2).

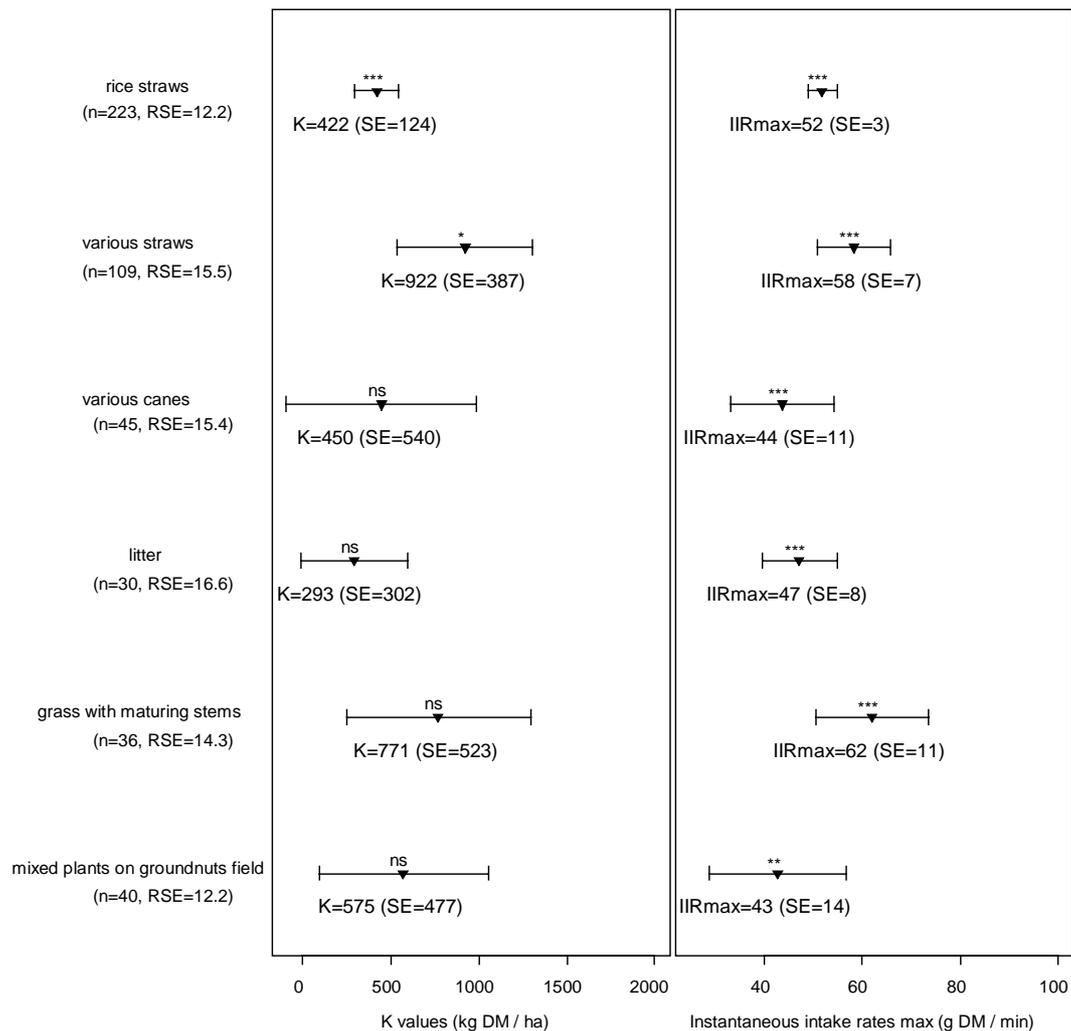


Figure 2. Variations of the Michaelis-Menten models parameters K and IIRmax (Instantaneous intake rates max). Segments are the parameters' confidence intervals. IIRmax is the asymptotic instantaneous intake rate (IIR, g DM/min) and K has a biomass (kg DM/ha) dimension. Parameters correspond to one cover type for which it was possible to adjust such a non-linear model. The standard error (SE) of the parameters and the residual standard errors (RSE) of the models are given. Parameters' significance (*t*-test) are also indicated (***: $P < 0.001$, **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$, else: *ns*).

Parameters' significance illustrates the goodness of fit of the model to data. Hence, in the case of *ns* parameters, one should consider that the Michaelis-Menten IIR model is non-appropriate. We note that only cover types made of rice straws and various grass straws have significant parameters corresponding to the cases where we have the highest number of observations. For other cover types, parameters IIRmax were always significant but K were not. Hence, we decided to adjust all cover types' data into one model. The numerical values of the models parameters are quite different between cover types. We discuss later the choice of a global model. In this global model including the six selected cover types, the K- and IIRmax-coefficients are significant ($P < 0.001$). K is then equal to 673 kg DM / ha, and IIRmax is equal to 55 g DM / min.

We show however two examples of Michaelis-Menten models on Figure 3, on rice straws (a) and cereal canes (b). First, the number of observations largely differs from one cover type to the other. It depends directly on the time cattle stay on the vegetation unit. For instance, from the second part of EDS to the beginning of LDS, the rice field is the most grazed vegetation unit.

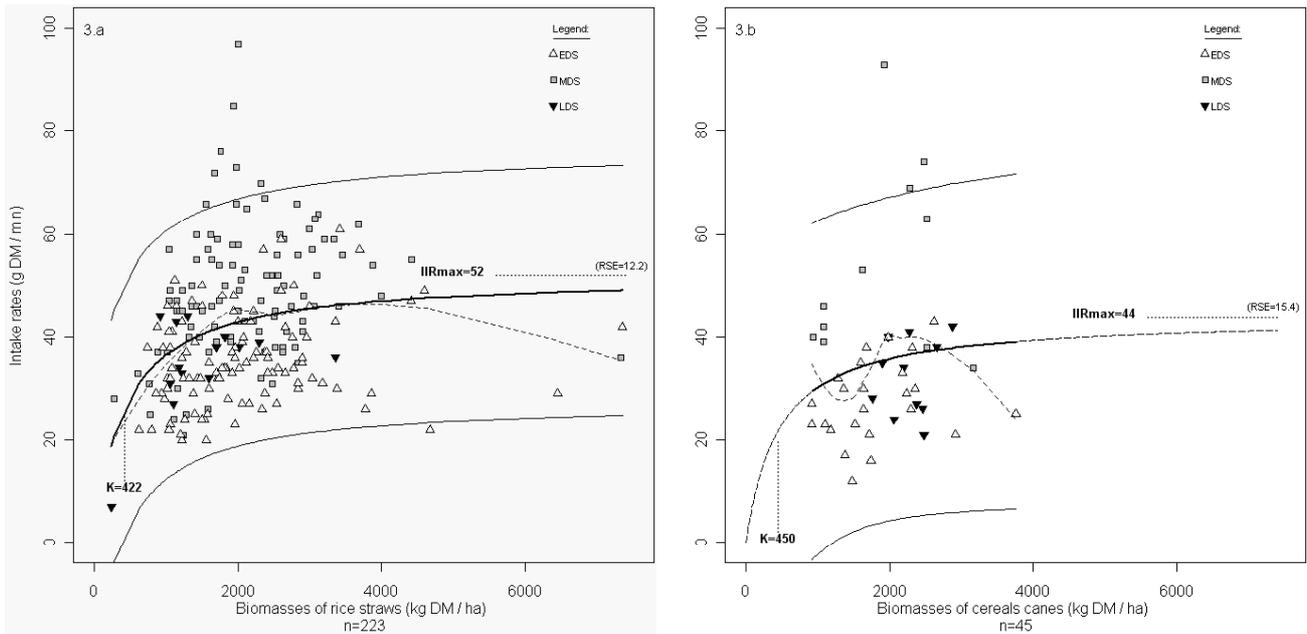


Figure 3. Examples of Michaelis-Menten models (bold curves) adjusting plots of instantaneous intake rates (IIR) as a function of the available biomass (Bm), recorded on the rice field (a) and on maize, millet and sorghum fields (b). Seasons of the observations are indicated for each point: early (EDS), mid (MDS) and late dry season (LDS). For each models, parameters K and IIRmax are written, besides the residual standard error (RSE). The curves bordering the model adjustment are the limits of the confidence interval of the mean curve. The dashed line smoothes the plot, through a method of local polynomial regression fitting, using the least squares.

On Figure 3 (a & b), variability among data is noticeable. The Michaelis-Menten formalization was applied as a postulat, according to referenced literature. However, the smoothing of the rice straws (Fig. 3, a) goes in the same way with a first part increasing with Bm and further varied around a potential asymptote. On canes data (Fig. 3, b) with a narrower definition domain and less observations, it is more difficult to conclude. However, for both cover types, points from MDS correspond to higher IIR. A Student's test on IIR segmented per season indicates that those from MDS are significantly higher than in EDS and LDS ($P < 0.001$). A plot analysis of IIR function of Bm, mixing the six cover types previously presented, per season, show this difference too, through a smoothing curve or a Michaelis-Menten model. The Michaelis-Menten formalization seems to be convenient per season regarding its parameters' significance (IIRmax: $P < 0.001$, K: $P < 0.05$). In EDS and LDS, IIRmax value is equal, respectively, to 41 ± 2 and 49 ± 6 , but reaches 58 ± 3 g DM / min in MDS. Elements of interpretation of this difference in MDS are discussed below.

On the other hand, we found several IIR of cover types on which we could not apply the Michaelis-Menten adjustment (see Tab. 3). It is the case for (i) vegetation on which we did not have enough observations (see millet ears and high green material). It is also the case for (ii) vegetation where the smoothing of the IIR-Bm-plot with few points is quite constant (see millet leaves and ligneous material). In addition we add in this category (iii) the type of short grass regrowths, not well-fitted a Michaelis-Menten model.

We separated senescent fruits from the ligneous materials (Tab. 3), which includes mostly green leaves and twigs. Senescent fruits are mostly mangos. Mangos lie on the ground, in LDS only. When cattle are searching for those fruits they do not consume any other cover type. We note that senescent fruits, ligneous material and short grass regrowths covers have close and low median-value (9.0 to 11.9) which may be due to difficulty to be handled.



Table 3. Summary of cows' instantaneous intake rates (IIR, g DM/min) on some cover types of the sahelo-soudanian agropastoral territory (south Senegal). These IIR did not appear to really depend on biomass (Bm), contrary to the functional response theory, unless the range of Bm observed values is not wide enough to be extrapolate by a predicting model. The cover type "high green grass & leg." is a mixed cover of high green material with grass and leguminous species. The "senescent fruits" were collected in late dry season.

cover type	mean	mini	1st quartile	median	3rd quartile	maxi
high green grass & leg. ($n=4$)	39.8	20.0	38.8	46.0	47.0	47.0
millet leaves ($n=28$)	32.9	23.0	26.5	31.5	38.5	49.0
millet ears ($n=9$)	25.3	18.0	19.0	20.0	28.0	46.0
ligneous material ($n=24$)	14.2	5.0	6.8	9.5	17.0	61.0
senescent fruits ($n=26$)	12.1	0.0	5.5	11.9	16.7	34.8
short grass regrowths ($n=92$)	10.9	5.0	7.0	9.0	13.0	47.0

2.2.3. Share of instantaneous intake rates' variability explanation between the measured variables. We used a removable procedure to examine the successive *AIC* of a linear model parameterized according to relevant factors cited previously in the Materials and Methods part. We used this method to evaluate the effect of factors on the explanation of IIR. The model with the lowest *AIC* encompasses these following environmental factors: Bm, season and cover type, with their interactions ($P < 0.01$). Among animal factors, the frame size is also significant: $P < 0.01$. The test stresses a tendency ($P = 0.08$) for a negative effect of pregnancy. These results were completed with other analysis ways. As season and cover types are of prime importance in the IIR variability, we drove similar analyses per season then per cover types. That permitted to stress the real effect of frame size whatever the season ($P < 0.05$) but currently, the frame size effect is not significant on each cover type. It is however particularly significant on rice straws ($P < 0.01$), whatever the season. As rice straws participate largely to the cattle diet during EDS and MDS (but less in LDS), that could contribute to explain the frame size significance in the aggregate model.

2.3. Relation between daily and instantaneous intake rates

The model [4] linking DIR to IIR applied on the entire DS is not as reliable ($R^2 = 0.68$) as those obtained per season. That is why we propose a model for each season, in Table 4. All R^2 are satisfactory because the intercepts were forced to 0. When the P -values are not significant (> 0.05) that means that the proposed model may not be extrapolated to other situations.

Table 4. Estimations and test of C_{st} and C_{nSt} parameters per season (early- = EDS, mid- = MDS and late dry season = LDS) in linear models [4] linking DIR to IIRst and IIRnst, in agropastoral situation. Significance of coefficients (P -values, t -test) are precised, as the determination coefficient R^2 of the model.

season	parameter	estimate	standard error	P -value (parameter=0)	R^2
EDS	C_{st}	+0.460	± 0.110	0.003	0.85
	C_{nSt}	+1.118	± 0.549	0.076	
MDS	C_{st}	+0.005	± 0.025	0.832	0.98
	C_{nSt}	+0.176	± 0.019	< 0.001	
LDS	C_{st}	+0.018	± 0.064	0.792	0.97
	C_{nSt}	+0.277	± 0.046	< 0.001	

2.4. Application of the methods to data from a sahelian pastoral rangeland

2.4.1. Instantaneous intake rates results in the pastoral area. We present IIR estimated with the same protocol on the pastoral area of northern Senegal, Dahra region. This territory is basically composed of a grass and shrub steppe and arbutive savannas thus differing from agropastoral ecosystem. Cattle diets include grass straws mainly, then millet straws and some ligneous materials. Herds we observed were not allowed to enter on millet fields. That is why we only have observations on grass straws. Besides, we were not able to determine IIR on ligneous materials, that were however limited. Therefore, Figure 4 gives a IIR-Bm-plot of straws, according to seasons.

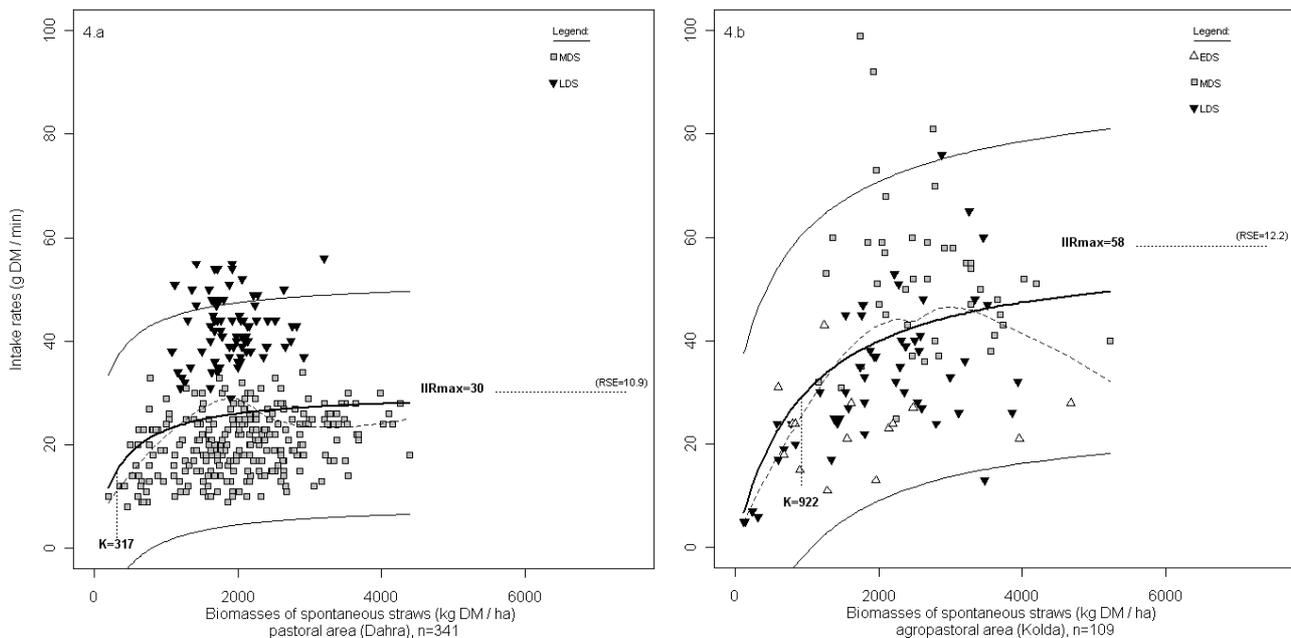


Figure 4. Michaelis-Menten model (bold curve) adjusting the plot of instantaneous intake rates (IIR) as function of available biomass (Bm), calculated on various straws in the pastoral area of North Senegal (4.a), during mid- (MDS) and late dry season (LDS), and in the agropastoral area of South Senegal (4.b), during the whole dry season including early dry season (EDS) then MDS and LDS. The curves bordering the model adjustment are the confidence interval of the mean curve. The dashed line smoothes the plot, through a method of local polynomial regression fitting, using the least squares).

As for data from the agropastoral area (cf. Fig. 3 and Fig. 4, b), there is a difference of IIR regarding the season in the pastoral area (Fig. 4, a). Model parameters are however significant ($P < 0.02$). A presentation of observations per season gives two models: $K = 303 \pm 79$ kg DM / ha and $IIR_{max} = 24 \pm 1$ g DM / min in MDS ($RSE = \pm 5.5$, $n = 261$), and $K = 193 \pm 167$ kg DM / ha and $IIR_{max} = 47 \pm 4$ g DM / min in LDS ($RSE = \pm 6.3$, $n = 80$). In MDS, parameters are both significant ($P < 0.001$), whereas K value is not significant in LDS ($P = 0.25$) due to the lack of data for low Bm.

As for IIR from the agropastoral area, we searched for explanation on the variability, i.e. for understanding which factors affect IIR. In pastoral areas, Bm and season appear highly significant ($P < 0.001$). The Bm criterion significance confirms our hypothesis of a strong link between IIR and Bm. The significance of seasonal differences convinced us to separate observations according to seasons. That is similar with results we presented before, from the agropastoral area. In addition, the herd factor and the interaction between herd and season were selected by the AIC ($P < 0.006$). Estimated IIR thus varied according to the herd, but amongst herds, we did not find any differences between smaller or larger cows or between pregnant and non-pregnant ones ($P > 0.1$). That differs from the agropastoral region.

2.4.2. Daily intake rates results in the pastoral area. DIR is estimated from dung collected on the range through NIRS method. Distance of the samples to the database is short ($mean = 6.4, n = 45$), which means that the predictions should have credit. NIRS calculations are in average 4.6 ± 0.1 kg DM/d daily during the LDS.

2.4.3. Using seasonal and steady vs non steady circuits'bouts (equation [4]) to determine daily intake rates in the pastoral area. Using equation [4] requires knowing the durations of grazing, steady or not. In the agropastoral Kolda region, grazing activity vary between 56% and 80% of the circuit durations (Chirat et al. submitted). On the contrary, in the pastoral Dahra region, grazing activity is reduced to 34% in MDS and 26% in LDS ($n = 20$). This is because different feeding activities are here clearly separated. While in the agropastoral rangeland, cattle are often moving while grazing, we divided observations in "steady" and "non-steady" grazing. In the pastoral rangeland, area used by herds is wider. Cattle are obliged, every day, to reach the well 3 km far from the camp. Herds walk straight to the well then come back near the camp to graze. When cattle graze, they do not move much. Therefore, we considered all the time recorded as a steady grazing.

By using IIR-median values and grazing time spent, we found DIR equal to 0.3 and 2.1 kg DM daily, respectively in MDS and LDS. These low values are however logical because cattle are not parked at night, like in the agropastoral system, and they can keep grazing. As our observations were limited to the diurnal phase, i.e. from sunrise to evening when cattle are stopping on their resting area, we know that we underestimated the total grazing time. Besides, the non-significance of the parameter C_{st} in MDS and LDS stresses a part of the specificities of the agropastoral system, in the Kolda region. Nevertheless when compared to DIR estimates with NIRS (4.6 kg DM/d) it allows estimating the diurnal intake. A further effort should be made to access to nocturnal feeding behaviour.-

3. DISCUSSION AND MANAGEMENT IMPLICATIONS

Our aim was to predict feed consumption from field observations of intake processes during free-ranging parts of the dry season (DS), so that we can model intakes on different plant covers that are visited by animals. Our option is to spatialize the feeding behavior of cattle on a discretized environment in order to evaluate the effect of daily circuits on intake and, at a longer term, on animal performances. Even if animal performances are difficult to assess in our conditions we expect that unbalances between feed intake and level of production will induce changes in body condition (BCS). Values of animal BCS, for a given season's bout, are a reliable index of the past feeding bout (survival of the individual) and it further affects reproductive efficiency (survival of the species). This has been clearly shown on N'Dama cows whose breeding rhythms are driven by seasonal BCS evolutions (Ezanno et al. 2003). In addition, feeding experiments, in Senegalese cattle under controlled allowances, enables determination of the net energy content of one point change in BCS changes (Cissé et al. 1999). On the other hand, authors working on tropical cattle conducted field measurements aiming at evaluate the effect of frame size (Vargas et al. 1999) or the cows type (Abdalla and Elsheikh 2008) on daily intake on given rangelands. It is however clear that "intake is a major determinant of animal production" (Ungar, 1996). This is why, we studied voluntary intake as it may be the source, or the cause, of cattle performances according to well-known factors that have been highlighted under temperate climates (Chilliard et al. 1991). We expected that an exact prediction of daily intake rates (DIR) through instantaneous intake rates (IIR) and available biomasses (B_m) along the daily circuits, together with animal factors (physiological stage and frame size), would provide animal performances that could validate our model.

3.1. Analysis of daily intake rates as a results from night park faeces collections

Daily intake rates (DIR) were estimated from dung collected in the night park in the agropastoral area. We discuss here values found from the calculation with the digestibility rate or found from the NIRS method, regarding literature elements.

3.1.1. Analysis of daily intake rates results regarding the NIRS estimations. One of the interests of our study is to provide new informations on a poorly documented environment. In the agropastoral area, NIRS method correctly predicted DIR in early dry season (EDS) regarding our direct determination from faeces, but it overestimated it in mid dry season (MDS) and even more in late dry season (LDS). This may be due to prediction procedure, since the distance of our samples to the calibration database (see Tab. 1) increase along seasons. This is not surprising when considering the feeds included in that database since most of meals were constituted of millet or maize bran and rice straws. That typically corresponds to observed diets during EDS, while this was not the case in MDS where cattle feed still rice straw but not millet nor maize plants residues. This was even true for LDS where there are almost not rice straws available any more. However, during LDS, cattle consume more spontaneous resources on the range. We know that “rangeland meals” were used to calibrate the reference data. Regarding DIR predictions on Gobra cattle in the pastoral area in LDS, the fitting equations seem to be realistic. This confirms that those “rangeland meals” better correspond to the diet of cattle in this pastoral belt than to this of the agropastoral sub-arid land. On the other hand Garnsworthy and Unal (2004) and Decruyenaere et al. (2008) stressed that modifications in the diet imply important variations of the faecal spectra, linked to the intake level. For instance, a variation of non-digestible components or a modification of microbial species in the rumen may modify the spectra. However, even if these last remarks confirmed our observation, overall, the NIRS, when adequately calibrated, might be of great interest to predict DIR on rangelands.

3.1.2. Analysis of daily intake rates results regarding published data. We summarize data on daily intake levels estimated for cattle in sahelian areas in Table 5. When individuals are supplemented (Tab. 5), diet equilibrium in nitrogen and energy is expected to be better than from native rangeland. Moreover, in experimental station, feeds are in average more palatable and prehensible than in the range (see green cut Guinea grass supplemented with sweet potatoes foliage or groundnut hay). In rangeland, litter and senescent fruits supply a potential nutrient-rich feed, but various straws are filling the rumen. Works of Ayantunde et al. (1999 and 2001) and Molénat et al. (2003) are of interest since cattle ranged outdoor, conditions close to ours. However, DIR of young zebus are higher than DIR we determined (2.8 to 3.8 kg DM along DS). Besides, on rice fields, Gobra zebus DIR are also higher than our results. For Gobra cattle intake level, the DIR we estimated in the pastoral area with NIRS (4.6 kg DM) seems to be reliable. For N'Dama cattle, we suggest three elements to discuss the low intake levels we found: (i) a biased estimation of the DIR from faeces mass (FQ), (ii) an underestimation of the average digestibility (Dig) on the range, and (iii) it may exist a misestimating on animal frame size.

(i) The paired comparison between indirectly and directly estimated DIR from faeces (see Results) resulted in a correction: equation [5]. We thus found statistically that the assumption of a constant excretion rate along 24 h was false, cattle excretion rate being higher during corralling time. The non constant excretion rate is in accordance with observations of Ayantunde et al. (2001) but they concluded that the defecation rate during corralling time is lower than while grazing. Nevertheless on our dataset on bulls we infirmed their conclusions. That is why we concluded that applying a constant rate obtained during the night park to the whole day should overestimate DIR. Though the approximations to determine DIR, differences comparing DIR estimated under continuous faecal excretion assumption and DIR corrected by equation [5] are comprised between -10 and -33%. According to Ayantunde et al. (2001), a reduced digestive activity when resting at night is possible, as animal have sleeping bouts. In our case, this could be attenuated as animals ruminate only in the night park. Although not measured, our direct

observations suggest that cattle defecate just before entering the night park, and just after leaving, in the morning. That could induce a bias in our DIR calculations. Those increased excretion rates are linked to the end of intensive feeding activities when tied, and to the coming back from feeding activities. According to this assumption, that means that a part of dung miss in the night park collect. If this assumption is correct, and if the bias quantity is significant, therefore we may have underestimated DIR. It would be useful to test this hypothesis by quantifying the difference between the excretions rates measured in segmented bouts encompassing the night park time. This unstable defecation rate might also explain the high variability of DIR_{fq} estimated through equation [1] presented in Table 1. However, median DIR_{ni} estimated through NIRS indicates 3.8 kg DM in EDS, which is in accordance with estimations of DIR_{fq}.

Table 5. Daily intake rates (DIR, in kg Dry Matter per day) estimations from published works on tropical cattle. Live weights (LW), season of interest and other conditions are indicated.

authors	cattle	animal type	LW (kg)	area	season	diet	DIR (kg DM/d)
Ayantunde et al. 2001	Azawak zebus	young bulls	220 - 280	fenced paddocks, rotationally grazed, Niger	dry season	standing grass, forbs, litter	5.5 - 6.0
Ayantunde et al. 1999	Azawak zebus	young bulls	250 - 280				
Etela et al. 2009	Bunaji zebus	early lactating cows	282	station	-	2 times/d Guinea grass, supplemented with foliage or meal	7.2 - 8.9
	N'Dama cows		239				7.5 - 8.2
Akinbamijo et al. 2003	N'Dama cows	young bulls	157 (1) - 230 (2)	station	-	667 g/kg baby corn stalk, 333 g/kg bean vines	4.2 (1) - 6.2 (2)
Nouala et al. 2003	N'Dama cows	lactating cows	250	station	-	groundnut hay ad libitum, supplemented or not	6.8 - 7.6
Diop et al. 2005	Gobra zebus	-	250	Senegal	dry season	-	4.5 - 5.0
Cissé et al. 2003	Gobra zebus	steers (2.5 years old)	250	station	-	molassed rice straws / millet canes, supplemented	6.0
Molénat et al. 2003	Gobra zebus	average individual	250	rice fields, Senegal river	late dry season	rice straws mostly	4.5 - 5.0

(ii) Besides, the parameter Dig might be underestimated. Ayantunde et al (2001) gave a Dig varying between 55% and 51% from the first half of DS to the second respectively. Those estimations come from extrusa of fistulated Azawak steers, in the same conditions as given in Table 5. Schlecht et al. (2007) evaluated a Dig varying between 56% to 65%, for a diet including green feed, millet leaves and various grass straws. The study was driven in station, in Niger, on different breeds of zebus (307 – 323 kg LW). Our Dig values, varying from $53 \pm 3\%$ and $50 \pm 2\%$ along DS, were estimated from chemical composition of faeces. Results are rather constant during DS. It is possible that extrapolations to obtain those Dig would have introduced some underestimation. That could have an influence on DIR apparent underestimation, under the assumption that the N'Dama individuals' live weight is 250 kg LW.

(iii) In a previous study, for such N'Dama cattle on the same territory, Ickowicz and Mbaye (2001) proposed an average 4.4 kg DM/d per cow, per year, including the rainy season. Regarding our estimates this leads to a 7.0 kg DM DIR for the overall rainy season. Such an intake in rainy season is in agreement with the prevailing condition i.e. high availability and quality of green forages (Ouedraogo-Kone et al. 2006, Sanon et al. 2007). Besides, our hypothesis of a 250 kg LW for N'Dama cows may be overestimated (+ 50 kg) since an actual LW recently reported being 198 ± 5 kg (Knopf et al. 2004). Hence, our DIR estimates better fits with these lighter cows (around 200 kg LW).

3.1.3. Effectiveness of factors affecting daily intake rates. We attempted to explain DIR variability through classical factors. We found that herd factor may affect DIR in LDS and for parts in MDS, but not in EDS. This is logical since during EDS herds are grazing a common area, while from MDS to LDS they graze separately. Hence, in EDS, cattle are prevented by herders from access to non harvested rice fields, progressively open. That means that during EDS herds' circuits are equivalent in terms of intake. Because from MDS large and small herds do not visit the same vegetation sequences their intake are to be different. Factor pregnancy seems also to have an effect on intake in EDS and MDS ($P < 0.06$) while *ns* in LDS. In LDS, the absence of pregnancy effect may be due to the confusion between feed availability and the mean physiological status. The later being described with a majority of cows being mated in July–August (Ezanno et al. 2005). In LDS, with very limited forage availability, daily intake level is so low that there is no difference between pregnant and non-pregnant cows.

3.2. Estimation and prediction of instantaneous intake rates in dry tropical areas

3.2.1. Average estimation of instantaneous intake rates. In the literature, for large frame size 600 kg LW cows, instantaneous intake rates (IIR) values vary from 12 to 36 g DM/min on orchard grass microward. Cows with similar frame sizes, fed with alfalfa hay however, were observed once presenting to them microswards with leaves or stems (Ginnett et al. 1999). The bite rate was controlled; cows were limited to 10, 20, 30, 45 or 60 bites, which may represent less than one minute. The main conclusion is the more vegetal materials is green and non-fibrous, the higher IIR are, which is in agreement with many other studies (Koerth and Stuth 1991, Haschick and Kerley 1997, Prache and Peyraud 1997, Drescher et al. 2006b). Distel et al. (1995) worked on the response of 737 kg LW cattle to artificial swards of ray grass, with different densities or size. Observed during 5 min, bite rates were comprised between 55 and 64 bites/min, with IIR varying between 43 and 63 g DM/min. Compared with our estimated IIR between 9 and 58 g DM/min, we consider to be in agreement with above cited values, if we take into account the differences in cover types.

We found the lowest IIR for sparse cover types and materials difficult to handle (cf. Tab. 3), but discussion is necessary for IIR on cover types with straws or litter. Indeed, we obtained IIR values similar to above references, although agropastoral materials are more fibrous and sparse. Straws or litter cover are undoubtedly less palatable than green grass. Furthermore the N'Dama cows are far lighter (200 kg LW) than experimental cited cattle (600 kg LW). However, we assume our estimations are reliable. Arguments are: (i) there were two observers on the rangeland, in order to compare their evaluations. It was an efficient way to increase the reliability of this field method, which is still difficult to validate otherwise. Secondly, (ii) N'Dama are accustomed to their dry environment, like Holstein are used to european green pastures. For sure, they are able to cut dry and fibrous material more easily than temperate cattle, as they consume mainly straws during all DS. Finally, (iii) the precise estimation of IIR values that are representative of spontaneous animal behavior within any experimental design may be questionable (Agreil et al. 2006). Moreover, N'Dama cattle have strong non-foraging constraints, long distance walking to watering point and night park, then they are subjected to limited time for actual grazing. Their acquired habits (Provenza and Balph 1988) reinforce the necessity to maintain high IIR, thus explaining that such a small frame-sized cow has a relatively high IIR.

3.2.2. Source of variability of instantaneous intake rates. In the agropastoral Kolda region, cover types and biomass (Bm) are the two main factors that modify IIR. These two factors fulfill the assertion that IIR depend on Bm, according to the “conventional functional response”, and also on its quality (van Langevelde et al. 2008). A seasonal effect however remains on IIR, altering the functional response and showing high variability. IIR were indeed higher in MDS than those measured in EDS and LDS (cf. Fig. 2). We propose therefore several elements of interpretation. First, (i) at the patch scale we noted that there were differences in term of average palatability (animal) and handling difficulties (operator). Hence, during EDS we had difficulties to handle rice straws that were not fully dried. During the MDS, rice straws Bm is still high with straws being footed. It is easier for cattle to collect rice straws at this season. Furthermore, animals are well accustomed to this cover type since they spend a long part of the daily circuit on these fields. Considering LDS, this cover type evolved toward short grass regrowths that are difficult to handle. Secondly (ii) at the territory scale, we noted the same tendency, whatever the cover types. During EDS, plants' Bm is high and made of resistant materials. In MDS, Bm are still quite high with a good palatability. While in the LDS, Bm is sparse and reduced but fragile and easy to pick. Altogether, there are confounding effects of season and animal management that made the initial cover type classification to be adapted to better fit to the conventional functional response. We suggest that prehensibility and distribution of resource are more effective factors than fibrosity on IIR in such tropical territories.

Considering animal factors that may affect the relationship between IIR and Bm, frame size, physiological status and herd behavior are to be discussed. We observed that larger cows have higher IIR than smaller one (on rice straws during all DS, where it is particularly reliable: 39 vs 44 g DM/min in average, $P < 0.01$). In rangeland, it was stated that IIR are primarily controlled by bite size and secondarily modulated by bite rate (for cattle: Ginnett et al. 1999, for small ruminants: Agreil and Meuret 2004). Even if we could not directly confirm this assertion, because we did not directly measure the bite size, the weak relationship observed between IIR and bite rates (for instance, on various straws: $R^2 = 0.16$) does not disclose an effect of frame size amongst animals that introduce variability. For physiological factor, the tendency ($P = 0.08$) of higher IIR for non-pregnant, as compared to pregnant cows, is difficult to compare with indoor published observations. If confirmed as non-artefactual, this would explain a part of the observed variability of IIR amongst cows. For the herd factor, several explanations are evoked in the literature. It has been suggested that grazing cows may attempt to match their nearest neighbour in IIR, which tends to push towards a maximization of IIR as the result of competition for feed (Provenza and Balph 1988). If such a behavioral phenomenon operates, it might explain the already discussed higher IIR we obtained when compared to individual stall fed animals. Returning to the herd level, one should expect that cows grazing in large herds would have higher IIR than those kept in small, with an increasing competition among cows. In our case, such a phenomenon would have happened in the pastoral area of Dahra, where we observed a clear effect of the herd size ($P = 0.006$) at the end of dry season (LDS). Considering the range of available Bm according to locations (Dahra vs Kolda) and seasons, it is worth to note that this herd effect only happened at the lowest available Bm. Hence even if we cannot prove that IIR is affected in all situations it cannot be excluded that this occurs within herds. Similar conclusions were drawn by Coppolillo (2000): observations of zebu cattle herds in the Rift valley (East Africa) showed that larger herds walked more and spent less time grazing without any measurable changes in IIR. Hence the high variability of our estimates of IIRmax, and even more for K values, according to cover type may partly be due to the competition within herd (Fig. 2) that is confounded with the season effect.

We attempted to predict the IIR of cows from Bm through a Michaelis-Menten adjustment model. It provides parameters that can be of biological significance. In agreement with recommendations of van Langevelde et al. (2008), we made these adjustments within each cover type defined as the minimal unit of homogeneous plant resource. Considering factors that increased variability of IIR that were discussed above, we consider that we provide an original characterization of intake behavior of these N'Dama cows according to Bm for several cover

types (Fig. 2). When adjustments were possible, the numerical values of IIRmax, together with the K-values, i.e. the Bm level that may limit intake rate, we could predict animal intake behaviour. On other cover types, when adjustments were not possible, i.e. partly insufficient data number, we assumed that actual IIR is the median values of observed IIR whatever the Bm level (Tab. 3).

The limitation of this method being there are strong seasonal differences for a given cover type. This limitation is further apparent when comparing, for a similar cover type like straws, IIR values of differing cattle (N'Dama vs Gobra) in different locations (Kolda vs Dahra). The relation we stressed between IIR and Bm is in good accordance with the functional response theory but there is a need for calibration in each agro-ecological area and also for each season for a given type of cattle.

3.3. Relation between instantaneous intake rates and daily intake rates

We aimed to link IIR with DIR estimated through faecal collections methods or NIRS. For this we previously modeled daily circuits (Chirat et al. submitted) and observed instantaneous feeding behavior on each successive cover types. As IIR estimation is a time consuming method, we aimed to predict IIR from Bm on each cover type. But Bm on each cover type does not univocally determine IIR, mainly because of the complex seasonal effect but to the intake behavior modulations cattle do into the grazing day (Boval et al. 2007). At the daily time scale, one possibility could be to introduce stochastic variations of IIR within the observed confidence interval. Before validating this possibility, there is a need for a representative estimation of daily time spent eating at the predicted IIR level. We proposed equation [4] that predict DIR by allocating total daily duration of feeding activities into steady and non steady bouts thus weighting the IIR according to visited cover types, along the daily circuits. Here again, there is a need to take into account specificities of territories and types of cattle. We demonstrate that such equations strongly depend on the spatial behavior of cattle. In the pastoral rangeland, Gobra zebu walk long distances daily (7 to 15 km/d, in the second half of DS, $n = 20$), before they reach the well and thereafter return to grazing areas. In this case two “large meals” (Jarrige et al. 1995) were identified when cows are grazing with very limited movements. At the opposite, N'Dama cattle that have to cover a shorter daily distance (7.6 km /d vs. 5.4 km/d in average on a year, respectively for large and small herds, $n = 181$) between the park and the watering point, no large meal could be evidenced.

Once more, in a given agro-ecological situation, it is necessary to establish such a relationship between IIR and feeding activities to predict DIR with measurements of time spent grazing while moving from one cover type to another. Facing such a complex process it was tempting to allocate DIR onto each of the visited cover types. This would however lead to apply an averaged IIR that will not represent expression of the functional response theory that we confirmed to operate on the most frequently visited cover types. In conditions where cattle graze while moving from one cover type to another under the constraint of reaching watering points and night park, ours proposals to estimate the animal feed uptake, although not parsimonious because IIR has to be measured, appeared to be the only realistic solution. However, regarding the difficulty to link IIR with DIR thanks to a robust equation, we propose to integrate both scenarii of DIR simulations (i) from IIR and (ii) from a calibrated uniform segmentation of DIR data per time step, in a spatialized model of the cattle feeding behavior. Option ii could be when it is not possible to apply a protocol of mechanical interactions between cows and cover types, in the field. Those options should permit to appreciate from which method emerge the more realistic DIR predictions, besides the daily diet composition.

CONCLUSION

Measuring instantaneous intake rates (IIR) of free ranging cattle fed on tropical semi-arid and sub-arid territories was a necessary step to quantify the contribution of distinct vegetation cover types (e.g. grass straws, ligneous materials) to the cattle diets. For each cover types of a territory, this provides estimations of states of biomass (Bm) stocks along the dry season. When combined with grazing bouts observed along daily circuits, IIR assessments also allow calculating daily intake rates (DIR). This later point being a further step toward explaining observed changes of daily circuits along the dry season (Chirat et al. submitted). Cattle free ranging circuits being driven by the necessity to fulfil their nutrients requirements, including watering, that might explain animal performances along the dry season (Ezanno et al. 2003).

This analytical approach was applied to N'Dama cattle of a sub-arid village territory near Kolda, south of Senegal. Modeling the relationship between measured IIR and total available forage Bm on twelve cover types were performed during the dry season, according to the “conventional functional response” (van Langevelde et al. 2008). These cattle in their specific environment have higher IIR than most of published data obtained on favourable temperate context with heavier breeds. We discussed the multiple sources of variations of IIR due to both animal (frame size, physiological state and herd behaviour) and states of cover types (interaction between available biomass and their palatability along the dry seasons). We finally obtained models describing IIR according to Bm, that provide IIRmax and K values of main cover types. As in these environments most of the feeding activities are “grazing while walking”, and particularly in the agropastoral area, we divided bouts into steady and non steady intake in order to provide a realistic uptake of plant material on each visited patch. It appears useful to attempt to predict DIR, combining IIR with intake time. In parallel, DIR were estimated from night collected faeces with two methods. First, DIR were estimated applying mean digestibility coefficient and secondly, we attempted to predict DIR directly through near infra-red spectra (NIRS) from previously established equations. Both methods gave realistic mean values for the DIR, although uncertainties were discussed. The validation of this approach will be undertaken by the simulation of both circuits and DIR from IIR that is not in the scope of this paper.

Such a methodology was applied, on a shorter duration, on Gobra zebus in a pastoral rangeland in a semi-arid village territory near Dahra, north of Senegal. Given the difficulty to obtain DIR due to permanent grazing, the solution would be to use NIRS analysis of faeces after a direct dung collection. Concerning IIR, adjusted according to available Bm of each cover type, we found response laws that are in global agreement with the observations conducted in the south Senegal. Altogether this analytical approach of free ranging cattle in complex ecological environments proved to be relevant in these two different pastoral situations since we confirmed that intake behavior of these animals were within the framework of the “conventional functional response” (van Langevelde et al. 2008). We planned to propose simplifications of this methodology by modeling IIR according to Bm, but we demonstrate that there is a necessity to better describe cover types along the dry season. Our main conclusion is that such a methodology needs to be calibrated to each situation including animals, cover types, but seasons too.

ACKNOWLEDGMENTS

We extend thanks to breeders and to the Livestock research centers of Kolda and Dahra for the work facilitation in the field. We gratefully acknowledge D. Bastianelli, L. Bonnal and P. Lecomte (CIRAD) for technical support on NIRS samples measures, and E. Gonzalez-Garcia (INRA) for writing supervision. We are also grateful to H. Diaf and L. Della Rossa for their assistance during their master internships.

LITERATURE CITED

- Abdalla, M. Y., and A. S. Elsheikh. 2008. Postpartum interval of Darfurian cows: Influences of breed, BCS, parity and season. *African Journal of Agricultural Research* 3:499-504.
- Agreil, C., and M. Meuret. 2004. An improved method for quantifying intake rate and ingestive behaviour of ruminants in diverse and variable habitats using direct observation. *Small Ruminant Research* 54:99-113.
- Agreil, C., M. Meuret, and H. Fritz. 2006. Adjustment of feeding choices and intake by a ruminant foraging in varied and variable environments: new insights from continuous bite monitoring. *In: V. Bels [ed.]. Feeding in domestic vertebrates: from structure to behaviour.* p. 302-325.
- Ayantunde, A. A., S. Fernandez-Rivera, P. Hiernaux, H. van Keulen, H. M. J. Udo, and M. Chanono. 2001. Effects of timing and duration of grazing of growing cattle in the West African Sahel on diet selection, faecal output, eating time, forage intake and live-weight changes. *Animal Science* 72:117-128.
- Ayantunde, A. A., P. Hiernaux, S. Fernandez-Rivera, H. van Keulen, and H. M. J. Udo. 1999. Selective grazing by cattle on spatially and seasonally heterogeneous rangeland in Sahel. *Journal of Arid Environments* 42:261-279.
- Bailey, D. W., J. E. Gross, E. A. Laca, L. R. Rittenhouse, M. B. Coughenour, D. M. Swift, and P. L. Sims. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management* 49:386-400.
- Benvenuti, M. A., I. J. Gordon, and D. P. Poppi. 2008. The effects of stem density of tropical swards and age of grazing cattle on their foraging behaviour. *Grass and Forage Science* 63:1-8.
- Bergman, C. M., J. M. Fryxell, C. C. Gates, and D. Fortin. 2001. Ungulate foraging strategies: energy maximizing or time minimizing? *Journal of Animal Ecology* 70:289-300.
- Bosso, N. A., E. H. van der Waaij, K. Agyemang, and J. A. M. van Arendonk. 2009. Genetic parameters for growth traits in N'Dama cattle under tsetse challenge in the Gambia. *Livestock Research for Rural Development* 21. Available at: <http://www.lrrd.org/lrrd21/3/boss21033.htm>. Accessed 5 April 2009.
- Boval, M., A. Fanchone, H. Archimede, and M. J. Gibb. 2007. Effect of structure of a tropical pasture on ingestive behaviour, digestibility of diet and daily intake by grazing cattle. *Grass and Forage Science* 62:44-54.
- Burnham, K. P., and D. R. Anderson. 2002. Model selection and multimodel inference. A practical information-theoretic approach. Springer Science, New York, USA.
- Chilliard, Y., M. Cissé, R. Lefaivre, and B. Rémond. 1991. Body condition of dairy cows according to lactation stage, somatotropin treatment, and concentrate supplementation. *Journal of Dairy Science* 74:3103-3116.
- Chirat, G., A. Ickowicz, S. Messad, and F. Bocquier. submitted. Modeling Free-Ranging Cattle Spatial Behavior in Sahel: Daily Circuits Description, Conceptualization and Validations. *Rangeland Ecology & Management*.
- Cissé, M., Y. Chilliard, F. Bocquier, I. Ly, and A. Grégoire. 1999. The biological significance of the body condition score in terms of body lipid and energy content in zebu cattle (*Bos indicus*). Comparison between two scoring scales. *South African Journal of Animal Science* 29:197-198.
- Cleveland, W. S., E. Grosse, and W. M. Shyu. 1992. Local regression models. *In: J. M. Chambers and T. J. Hastie [eds]. Statistical Models in S* Wadsworth & Brooks/Cole.
- Coppolillo, P. 2000. The Landscape Ecology of Pastoral Herding: Spatial Analysis of Land Use and Livestock Production in East Africa. *Human Ecology* 28:527-560.
- Decruyenaere, V., P. Lecomte, C. Demarquilly, J. Aufrere, P. Dardenne, D. Stilmant, and A. Buldgen. 2009. Evaluation of green forage intake and digestibility in ruminants using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): Developing a global calibration. *Animal Feed Science and Technology* 148:138-156.
- Distel, R. A., E. A. Laca, T. C. Griggs, and M. W. Demment. 1995. Patch selection by cattle: maximization of intake rate in horizontally heterogeneous pastures. *Applied Animal Behaviour Science* 45:11-21.

- Drescher, M., I. M. A. Heitkönig, J. G. Raats, and H. H. T. Prins. 2006a. The role of grass stems as structural foraging deterrents and their effects on the foraging behaviour of cattle. *Applied Animal Behaviour Science* 101:10-26.
- Drescher, M., I. M. A. Heitkonig, P. J. Van Den Brink, and H. H. T. Prins. 2006b. Effects of sward structure on herbivore foraging behaviour in a South African savanna: An investigation of the forage maturation hypothesis. *Austral Ecology* 31:76-87.
- Ezanno, P., A. Ickowicz, and F. Bocquier. 2003. Factors affecting the body condition score of N'Dama cows under extensive range management in Southern Senegal. *Animal Research* 52:37-48.
- Ezanno, P., A. Ickowicz, and R. Lancelot. 2005. Relationships between N'Dama cow body condition score and production performance under an extensive range management system in Southern Senegal: calf weight gain, milk production, probability of pregnancy, and juvenile mortality. *Livestock Production Science* 92:291-306.
- Fanchone, A., M. Boval, P. Lecomte, and H. Archimède. 2007. Faecal indices based on near infrared spectroscopy to assess intake, in vivo digestibility and chemical composition of the herbage ingested by sheep (crude protein, fibres and lignin content). *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 15:107-113.
- Ferber, J. 1995. Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective. InterEditions [ed], Paris, France. (in French)
- Garnsworthy, P. C., and Y. Unal. 2004. Estimation of dry-matter intake and digestibility in group-fed dairy cows using near infrared reflectance spectroscopy. *Animal Science* 79:327-334.
- Ginnett, T. F., J. A. Dankosky, G. Deo, and M. W. Demment. 1999. Patch depression in grazers: the roles of biomass distribution and residual stems. *Functional Ecology* 13:37-44.
- Guérin, H., D. Richard, A. Duché, and P. Lefèvre. 1990. Composition chimique des fèces de bovins, d'ovins et de caprins exploitant des parcours naturels ou agro-pastoraux sahélo-soudaniens: utilisation pour estimer la valeur nutritive de leur régime. *Reproduction Nutrition Development*, suppl 2:167s-168s. (in French)
- Guérin, H., D. Richard, D. Friot, and N. Mbaye. 1986. Les choix alimentaires des bovins et ovins sur pâturages sahéliens. *Reproduction Nutrition Development* 26:269-270. (in French)
- Guérin, H., D. Richard, P. Lefèvre, D. Friot, and N. Mbaye. 1989. Prédiction de la valeur nutritive des fourrages ingérés sur parcours naturels par les ruminants domestiques sahéliens et soudaniens. In: The French Grassland Society [ed]. Congrès International des Herbages, Nice, France. p. 879-880. (in French)
- Haschick, S. L., and G. I. H. Kerley. 1997. Browse intake rates by bushbuck (*Tragelaphus scriptus*) and boergoats (*Capra hircus*). *African Journal of Ecology* 35:146-155.
- Hodgson, J. 1986. Grazing behaviour and herbage intake. In: British Grassland Society [ed]. Occasional Symposium. p. 51-64.
- INRA. 1987. Alimentation des ruminants: révision des systèmes et des tables de l'INRA. Bulletin Technique 70. (in French)
- Jarrige, R., Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.-H. Farce, and M. Journet. 1995. Nutrition des ruminants domestiques : ingestion et digestion. INRA [ed], Paris, France. (in French)
- Knopf, L., O. C. Komoin, B. Betschart, B. Gottstein, and J. Zinsstag. 2004. Production and health parameters of N'Dama village cattle in relation to parasitism in the guinea savannah of Côte d'Ivoire. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* 57:95-100.
- Koerth, B. H., and J. W. Stuth. 1991. Instantaneous intake rates of 9 browse species by white-tailed deer. *Journal of Range Management* 44:614-618.
- Le Moigne, J.-L. 1977. La théorie du système général, théorie de la modélisation. Presses Universitaires de France, Paris, France. (in French)
- Le Moigne, J.-L. 1990. La modélisation des systèmes complexes. Dunod [ed], Paris, France. (in French)
- Lecomte, P., F. Safietou, D. Friot, D. Richard, A. Ickowicz, H. Guérin, and L. Bonnal. 2003. Calibrating in vivo feeding value parameters on faeces NIRs spectral data's. Case of rations fed to tropical ruminants (Senegal). In: Institut de l'élevage and INRA [eds]. Rencontres Recherches Ruminants, Paris, France. 10:171. (in French)

- Manlay, R. J., A. Ickowicz, D. Masse, C. Feller, and D. Richard. 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.
- Molénat, G., C. Corniaux, S. Gueguen, C. Lacz, and F. Bocquier. 2003. Adapter les systèmes d'alimentation pendant la saison sèche pour les zébus laitiers sédentarisés en zone rizicole du Nord-Sénégal. *In: Institut de l'élevage and INRA [eds]. Rencontres Recherches Ruminants, Paris, France. 10:102. (in French)*
- Ngodigha, E. M., and U. I. Oji. 2009. Evaluation of fodder potential of some tropical browse plants using fistulated N'dama cattle. *African Journal of Agricultural Research* 4:241-246.
- Ouedraogo-Kone, S., C. Y. Kabore-Zoungrana, and I. Ledin. 2006. Behaviour of goats, sheep and cattle on natural pasture in the sub-humid zone of West Africa. *Livestock Science* 105:244-252.
- Prache, S., and J.-L. Peyraud. 1997. Préhensibilité de l'herbe pâturée chez les bovins et les ovins. *INRA Productions Animales* 10:377-390. (in French)
- Provenza, F. D., and D. F. Balph. 1988. Development of dietary choice in livestock on rangelands and its implications for management. *Journal of Animal Science* 66:2356-2368.
- [R] R Development Core Team. 2009. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rietkerk, M., P. Ketner, L. Stroosnijder, and H. H. T. Prins. 1996. Sahelian rangeland development; a catastrophe? *Journal of Range Management* 49:512-519.
- Rodriguez, L. 2008. Une perspective mondiale sur la valeur économique totale du pastoralisme : Un rapport de synthèse global basé sur six évaluations pays. IMPD - GEF - PNUD - IUCN, Nairobi, Kenya. (in French)
- Sanon, H. O., C. Kabore-Zoungrana, and I. Ledin. 2007. Behaviour of goats, sheep and cattle and their selection of browse species on natural pasture in a Sahelian area. *Small Ruminant Research* 67:64-74.
- Schlecht, E., P. Hiernaux, I. Kadaoure, C. Hulsebusch, and F. Mahler. 2006. A spatio-temporal analysis of forage availability and grazing and excretion behaviour of herded and free grazing cattle, sheep and goats in Western Niger. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 113:226-242.
- Schlecht, E., H. Richter, S. Fernandez-Rivera, and K. Becker. 2007. Gastrointestinal passage of Sahelian roughages in cattle, sheep and goats, and implications for livestock-mediated nutrient transfers. *Animal Feed Science and Technology* 137 93-114.
- Sere, C., H. Steinfeld, and J. Groenewold. 1995. World livestock production systems. FAO Animal Production And Health Paper, LEAD, Roma, Italia.
- Sidibé-Anago, A. G., G. A. Ouedraogo, and I. Ledin. 2008. Effect of season and supplementation during late pregnancy and early lactation on the performance of Zebu cows and calves. *African Journal of Agricultural Research* 3:640-646.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. Livestock's long shadow, environmental issues and option. FAO, LEAD Initiative, Roma, Italia.
- Ungar, E. D. 1996. Ingestive Behaviour. *In: J. Hodgson and A. W. Illius [eds]. The Ecology and Management of Grazing Systems. CAB International, Wallingford, UK. p. 185-218.*
- van Langevelde, F., M. Drescher, I. M. A. Heitkonig, and H. H. T. Prins. 2008. Instantaneous intake rate of herbivores as function of forage quality and mass: effects on facilitative and competitive interactions. *Ecological Modelling* 213:273-284.
- Vargas, C. A., T. A. Olson, C. C. Chase, J. A. C. Hammond, and M. A. Elzo. 1999. Influence of frame size and body condition score on performance of Brahman cattle. *Journal of Animal Science* 77:3140-3149.
- Walliser, B. 1977. Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes. Editions du Seuil [eds], Paris, France. (in French)

Conclusions partielles

1. VALEURS ET FACTEURS DE VARIABILITE DES VITESSES D'INGESTION INSTANTANEEES

Nous avons montré que les vitesses d'ingestion instantanées sont très dépendantes des facteurs de l'environnement spatio-temporel : les biomasses disponibles, les types de couvert et les saisons. Contrairement aux bovins sur prairies tempérées (Prache and Peyraud 1997, Delagarde and O'Donovan 2005), il semble que les vitesses d'ingestion soient moins liées à la hauteur des couverts qu'à la préhensibilité apparente. Il est cependant évident que la hauteur influe sur la préhensibilité, mais pour des couverts d'au moins 2 m. Cela a déjà été montré sur parcours tropicaux (Benvenuti et al. 2009). Pour les pailles de riz en particulier, les tiges sont plus digestibles que les feuilles, ce qui est le contraire des autres pailles. Elles contiennent beaucoup plus de silice (12-16%) et moins de lignine (6-7%) que les autres pailles (3-5% de silice, 10-12% de lignine), en moyenne (FAO en ligne). Ces faits induisent que le piétinement induit une meilleure préhensibilité du couvert. C'est l'interprétation que nous avançons pour expliquer en partie les différences significatives ($P < 0,001$) de vitesses d'ingestion instantanées entre début et milieu de saison sèche (Fig. 1) pour une même biomasse. Dans le même temps, les biomasses de ces pailles de riz diminuent fortement jusqu'en fin de saison sèche.

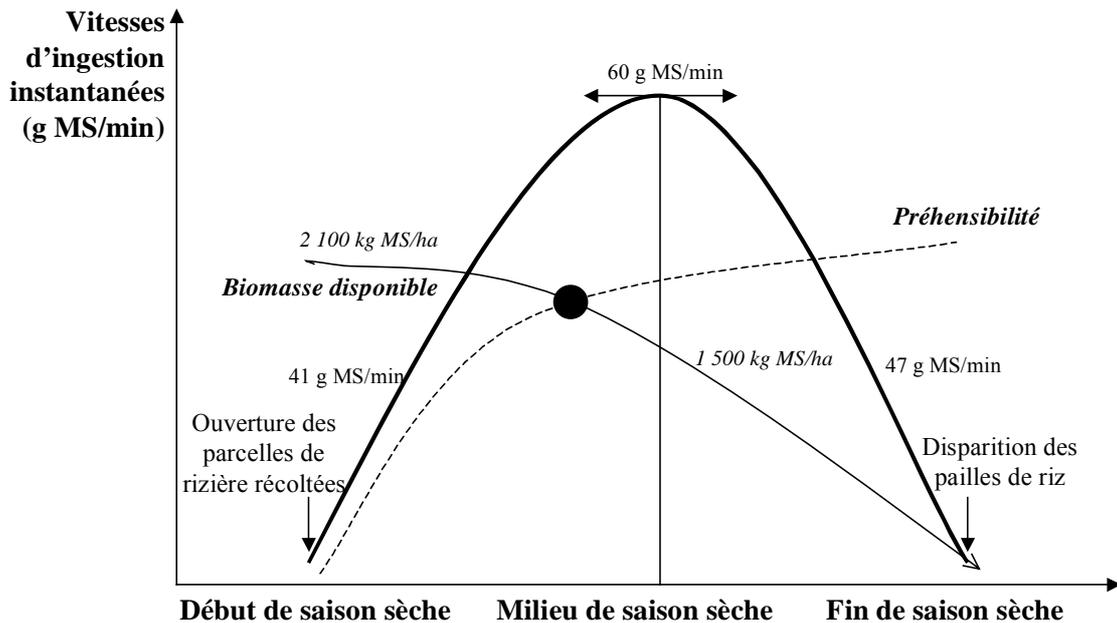


Figure 1. Evolution schématique des vitesses d'ingestion instantanées (g MS/min) au cours de la saison sèche, dans le cas des pailles de riz, sur le territoire agropastoral tropical de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal). Un maximum est observé en milieu de saison sèche. L'interprétation de l'évolution des vitesses d'ingestion est que l'augmentation des vitesses est liée à l'amélioration de la préhensibilité (liée au piétinement) jusqu'à un niveau de déplétion de la ressource qui entraîne la chute des vitesses d'ingestion. Comme l'évolution de la préhensibilité n'a pas été quantifiée, l'intersection des courbes d'évolutions des biomasses et de la préhensibilité a été fixée aléatoirement.

La préhensibilité des fourrages tropicaux est expérimentalement dépendante des proportions de tiges et de limbes (Ginnett et al. 1999), mais nous avons mis en évidence que le

piétinement des troupeaux induit une forte évolution de la préhensibilité de certains couverts. En outre, biomasses disponibles et préhensibilité des couverts se confondent dans un effet sur les vitesses d'ingestion instantanées en terme de dispersion de la ressource. En fin de saison sèche, les ressources consommées sont plus éparses sur le territoire : appareils végétatifs de ligneux, fruits sénescents, repousses graminéennes (c'est le seul renouvellement de stock végétal, vu l'affleurement de la nappe dans le bas-fond). Cela impacte directement sur les vitesses d'ingestion, de 11 à 14 g MS/min en moyenne à cette saison, pour ces couverts.

Enfin, nous avons mis en évidence un effet global du format des animaux, quelque soit la saison ($P < 0,05$). Cela s'interprète simplement : un animal plus développé peut avoir une taille de bouchée plus importante. Toutefois, la relation allométrique entre format de l'animal et taille de ses bouchées n'est pas directe. En effet, d'une part, l'effet du format sur les vitesses d'ingestion instantanées n'a pas été mis en évidence sur l'ensemble des couverts observés et, d'autre part, ces vitesses d'ingestion instantanées semblent élevées (cf. Fig. 1) vu le format moyen des N'Dama (de l'ordre d'1 UBT) par rapport au format des bovins de 600 kg sur prairies tempérées pour lesquels Peyraud et Delaby (2005) ont avancé des vitesses d'ingestion variant entre 20 et 50 g MS/min environ. Deux explications ont été proposées pour l'apparente importance des vitesses d'ingestion instantanées que nous avons déterminées : (1) les N'Dama sont adaptés aux ressources grossières du terroir agropastoral tropical, et (2) il y a un effet stimulant du temps de pâturage limité. En effet, sur l'année, les animaux sont attachés au moins 12h par jour. Ils ne jouissent pas d'un pâturage nocturne comme les zébus Gobra au nord du Sénégal, pour lesquels sur des types de couvert proches en milieu de saison sèche, les vitesses d'ingestion instantanées sont plus faibles (30 g MS/min, à l'asymptote sur pailles spontanées).

Pour ces zébus, nous avons également mis en évidence un effet de la saison sur les vitesses d'ingestion ($P < 0,001$). Nous avons observé que la pression de pâturage des différents troupeaux sur le territoire pastoral augmente entre le milieu et la fin de la saison sèche, avec la diminution des aires d'alimentation. Donc qualitativement, le piétinement augmente et la préhensibilité des pailles s'améliore. Toutefois, nos observations ont été trop limitées dans cette zone agroécologique pour affirmer que c'est la seule explication de ces différences saisonnières de vitesses d'ingestion instantanées.

Pour conclure, les éléments de variabilité des vitesses d'ingestion instantanées présentés aident à comprendre nos difficultés à la maîtriser. En effet, il y a des effets conjoints de la dispersion des biomasses, de la structure intrinsèque des couverts, du piétinement des animaux, et des formats des bovins. A cela s'ajoutent peut-être la compétition relative sur la ressource que peut subir l'animal observé, et une autre variable que nous avons identifiée sans pour autant avoir été capables de la quantifier : la motivation à ingérer.

2. FACTEURS DE VARIATION DES QUANTITES INGEREES QUOTIDIENNES ET LIEN AVEC LES VITESSES D'INGESTION INSTANTANEEES

Il a été délicat de trouver une relation entre les vitesses d'ingestion instantanées et les quantités quotidiennes ingérées. Deux raisons ont été avancées : la variabilité des vitesses d'ingestion selon plusieurs paramètres (cf. ci-dessus) et le pâturage mobile des animaux, qui englobe une continuité de processus de déplacement et d'ingestion, depuis le pâturage non stable d'animaux en déplacement jusqu'aux phases stables de type « grands repas ».

2.1. Variabilité des quantités ingérées quotidiennes

Concernant les quantités ingérées quotidiennes, le principal résultat de nos travaux est leur diminution progressive avec le stock végétal, au cours de la saison sèche. Si ces quantités ingérées apparaissent faibles même en début de saison sèche, c'est sans doute que les vaches observées avaient un poids vif d'à peine 200 kg, comme cela semble être le cas pour les N'Dama sur parcours soudaniens (Knopf et al. 2004). En revanche, les niveaux d'ingestion d'aliments sont

clairement insuffisants en fin de saison sèche, comme le confirment les observations de l'état corporel des bêtes à cette période (Fig. 2).

Du début au milieu de saison sèche, la gestation semble être un facteur pénalisant pour les niveaux d'ingestion, jusqu'en fin de saison sèche où ces niveaux sont tellement faibles que l'encombrement du fœtus ne peut plus être une contrainte discriminante entre vaches gravides ou non. En revanche, les différences de niveaux d'ingestion entre troupeaux en fin de saison sèche ($P = 0,107$) laissent penser que la séquence de végétation parcourue devient très importante à cette période. La disponibilité de la ressource étant devenue limitée, il n'est pas étonnant que les circuits ne soient plus équivalents. Il est probable que ce soit la ressource végétative ligneuse qui permette aux troupeaux qui exploitent les ressources en forêt, contrairement aux autres, d'avoir un niveau d'ingestion plus élevé. Certes, la différence n'est pas nette entre les troupeaux que nous avons étudié (grand : 2,9 kg MS/j, petit : 2,7 kg MS/j), mais elle permet logiquement d'asseoir notre théorie proposée ci-avant.

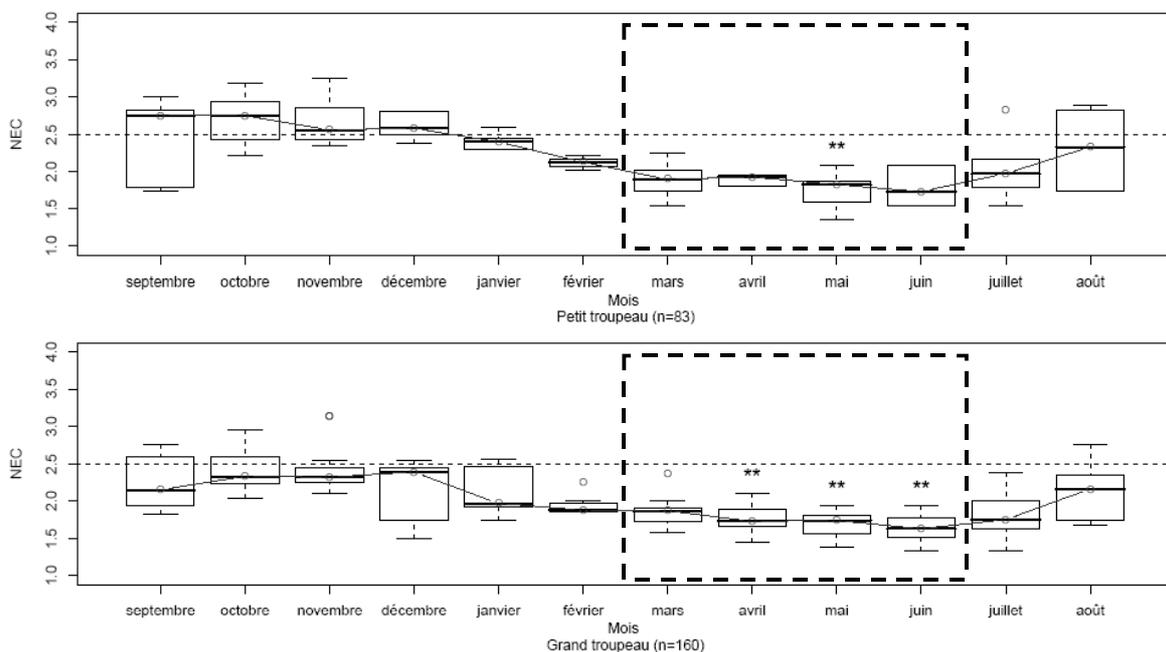


Figure 2. Evolution des notes d'état corporel (NEC) de bovins N'Dama sur le territoire villageois agropastoral tropical de Saré Yoro Bana au cours des saisons sèches (données : ABT). Les troupeaux ont été distingués selon l'effectif du cheptel (petit, i.e. < 70 têtes et grand, i.e. > 70 têtes). L'encadré correspond à la fin de saison sèche. C'est entre mai et juin que l'état corporel moyen des animaux est le plus mauvais, en accord avec les quantités ingérées quotidiennes, au plus bas de l'année (** : $P < 0,0045$, correction de Bonferroni).

2.2. Utilité de l'observation des vitesses d'ingestion instantanées pour la prédiction des niveaux d'ingestion quotidiens

Nous cherchons à la fois à développer une méthode simple d'évaluation des processus d'ingestion sur le terrain, et à faire émerger les quantités ingérées quotidiennes à partir de la représentation des circuits des troupeaux. Nous avons pu lier les vitesses d'ingestion instantanées aux biomasses des différents types de couverts consommés, conformément à la théorie de la Réponse fonctionnelle. Cependant, nous avons vu qu'il convenait de distinguer certains couverts pour lesquels cette loi était peu applicable (couvert ligneux, repousses sur rizière) et obligeait à définir des valeurs fixes. Nous avons pu également caractériser les différentes phases d'ingestion à Kolda. C'est une première étape dans le rapprochement des processus d'ingestion aux types de couverts végétaux.

Dans la zone agropastorale de la région de Kolda, nous avons aussi établi une relation linéaire entre les quantités ingérées et les vitesses d'ingestion saisonnières. Nous avons mis en évidence que l'effet de la saison sur les vitesses d'ingestion a un impact fort sur les coefficients de

l'équation de relation. La transposition de cette équation à la zone pastorale de la région de Dahra s'est avérée non fiable, particulièrement en milieu de saison sèche. Il reste donc nécessaire de prendre en compte les spécificités du territoire étudié en évaluant les vitesses d'ingestion pour les environnements et couverts spécifiquement étudiés.

Nous avons insisté sur la relation entre vitesses d'ingestion instantanées et biomasses. Toutefois, il a aussi été établi que ces vitesses d'ingestion sont contrôlées par les tailles de bouchées et modulées par la fréquence des bouchées (pour les bovins : Ginnett et al. 1999, pour les petits ruminants : Agreil and Meuret 2004). Nous nous étions donc intéressés, en parallèle, aux relations entre ces variables. Il n'a pas été possible, sur parcours, de mesurer les tailles de bouchées, mais nous avons enregistré les fréquences. Nous avons analysé les projections des vitesses d'ingestion instantanées en fonction des fréquences de bouchées, pour les types de couvert que nous avons pu caractériser par des modèles Michaëlis-Menten (cf. article précédent). Pour chaque couvert considéré, nous avons ajusté la projection par trois modèles linéaires, de degré 1 à 3. Une ANOVA indique quel modèle linéaire ajuste le mieux le nuage de points. Pour chaque type de couvert, le nombre de bouchées par minute augmente avec les vitesses d'ingestion, soit continuellement, soit jusqu'à une asymptote. Pour les pailles spontanées et la litière, entre autres, l'ajustement de degré 3 n'est pas le meilleur ($P > 0,13$), contrairement aux pailles de riz et aux graminées épiées ($P < 0,03$). Toutefois, les paramètres de l'ANOVA indiquent que les ajustements, cohérents, ne sont pas suffisants pour développer un outil de prévision des vitesses d'ingestion instantanées à partir des observations du nombre de bouchées.

Chapitre 2 :

Modéliser le Comportement Spatial de Troupeaux Bovins en Libre Pâturage au Sahel : Description des Circuits Quotidiens, Conceptualisation et Validations

Introduction : Éléments structurant des circuits quotidiens des troupeaux bovins sur parcours tropicaux en zones sèches

Décrire et analyser les processus d'ingestion doit s'accompagner d'une analyse des circuits journaliers des bovins. Les troupeaux N'Dama en libre pâture sur parcours agropastoral tropical sahélo-soudanien (cf. Annexe 3) sont attachés la nuit. Leurs circuits sont structurés quotidiennement par le passage à un point d'eau et par le retour aux alentours du parc de nuit, et entre temps par la recherche de fourrages. Comme nous le développons dans l'article qui suit, les facteurs abiotiques tels que la pente et les points d'eau peuvent être très structurants des circuits des troupeaux bovins sur parcours (Bailey et al. 1996, Ganskopp et al. 2000, Ganskopp 2001).

Dans notre recherche de représentation d'un système en libre pâture la caractérisation de la ressource végétale et de la réponse des bovins à cette ressource est, nous l'avons vu au chapitre précédent, complexe à maîtriser. Cela nous a conduit à décrire et analyser les circuits quotidiens, afin de saisir l'influence des différentes variables qui pourraient nous amener à simplifier la représentation des interactions entre troupeaux bovins et parcours.

1. DESCRIPTION DES VARIABLES D'ETAT DES CIRCUITS JOURNALIERS

Les variables d'état des circuits sont principalement les temps de parcours et les distances parcourues. Le travail consiste à enregistrer leurs valeurs au cours de la saison sèche puis d'analyser les relations potentielles entre elles et avec d'autres facteurs de l'environnement spatio-temporel. Les temps de parcours devraient évoluer au cours de la saison sèche, vu la raréfaction de la ressource végétale, mais aussi vu l'allongement (certes limité) du jour. Les heures de départ et de retour du circuit seront également comparées aux heures de lever et de coucher du soleil, et aux températures minimales et maximales. Nous nous attendons également à ce que les distances journalières augmentent au cours de la saison sèche, de même que les temps de parcours. Ces distances sont également comparées à l'éloignement entre point d'eau et parc de nuit, puisque ce sont deux éléments incontournables des circuits. Nous chercherons ici à analyser dans quelle proportion ces points de passage obligés structurent les circuits et permettent d'expliquer leurs caractéristiques (temps, distances, couverts fréquentés, etc.).

2. ANALYSES DES VARIABLES INTRA-CIRCUITS

Au sein d'un circuit, nous suivons en continu les activités des bovins, mobiles la plupart du temps, sur le parcours. Ces activités correspondent aux phases de pâturage, de déplacement, de repos, mais aussi de rumination ou encore d'abreuvement. L'enregistrement des activités alimentaires ou non des bovins sur parcours peut être enrichi d'une analyse spatiale des trajectoires et des temps de résidence des bovins en fonction des unités de végétation, par segmentation dans le temps et l'espace du circuit. Deux outils d'analyse spatiale nous ont permis cette segmentation fonctionnelle des circuits, afin de lier les activités sur parcours à l'utilisation du territoire : dimensions fractales des circuits (Nams 2005) et méthode des Temps de résidence (Benhamou 2004, Barraquand and Benhamou 2008).

Ces analyses doivent nous permettre de mieux comprendre à quels moments d'un circuit quotidien les processus d'ingestion deviennent prépondérants sur le comportement de déplacement. Afin de limiter le recours à la description des ressources végétales et de représenter le choix spatialisé des bovins en fonction de cette ressource, nous cherchons donc à décrire et analyser les circuits, *a priori* très structurés par les aménagements (parc de nuit et point d'eau).

Modeling Free-Ranging Cattle Spatial Behavior in Sahel: Daily Circuits Description, Conceptualization and Validations

Guillaume Chirat,¹ Alexandre Ickowicz,² Samir Messad,³ François Bocquier⁴

Authors are ¹PhD student in livestock science, CIRAD & INRA, ERRC, Place P. Viala, 34060 Montpellier; ²Senior Research Scientist in livestock science, CIRAD, ERRC, Place P. Viala, 34060 Montpellier; ³Statistician in livestock science, CIRAD, TA C-18/A Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier; ⁴Professor in livestock science, Montpellier SupAgro, ERRC, Place P. Viala, 34060 Montpellier, France.

Abstract

In semi-arid Africa, like but maybe more than in other parts of the world, extensive livestock systems are often based on free-ranging. In order to better control their impact on the environment and their performances, we still need to understand their spatial behavior. We first hypothesized that it is possible to have an influence on behavior by moving some attractive point locations like wells, night parks, or strategic forage resources on the range, like fenced areas, forage hays. In order to test this hypothesis, we searched for modeling those circuits. We studied the spatial and feeding behavior of N'Dama cattle, ranging on a village territory in the sub-arid part of Senegal, during several years. Depending on the season (within dry season or rainy season), cattle range free or are herded. Herds are tied during night and we analyzed the daily circuits characteristics. We predicted daily circuits durations along the year by a polynomial function based on calendar days ($R^2 = 0.84$), durations increasing along the dry season. We propose also explanations based on climatic, but we showed that introducing those variables to predict durations would not improve the model. For circuit distances, we found a difference concerning daily walked distances between large (> 70 individuals) and small herds ($P < 0.01$) and between dry and rainy season ($P < 0.01$). Some parts of daily walked distances are explained through the length between the night park, where cattle are tied during night, and the watering point. However it is not sufficient to predict the distances ($R^2 < 0.42$). We categorized three phases of feeding behaviors, according to our observations: grazing while walking (herd-size effect $P = 0.07$, dry vs. rainy effect $P < 0.01$, intra-dry season effect $P < 0.01$, *mean* = 68% of circuit duration on a year), walking (herd-size effect $P = 0.07$, dry vs. rainy effect $P < 0.01$, no intra-dry season effect $P > 0.2$, *mean* = 20% of circuit duration on a year), resting (no herd-size effect $P = 0.13$, dry vs. rainy effect $P < 0.01$, intra-dry season effect $P < 0.01$, *mean* = 10% of circuit duration on a year). The “grazing while walking” activity encompasses several intensities of grazing. We then applied a spatial analysis thanks to the Residence Time (RT) method. We analyzed RT curves according to seasons. Those curves should permit to better analyze and segment circuits in different bouts of partially homogeneous feeding behaviors. At the same time, we tested our central hypothesis in a spatialized agent-based model: how sufficient are abiotic factors to represent free-ranging cattle? Previous descriptive elements permitted to advance on the issue, providing factors for conceptualization, calibration and validation. We developed a time-dependant exponential function of interest, which gave convenience to simulations. We were able to find several good combinations regarding observed criteria, previously described. However simulations of cattle agents are not fully satisfying. Introducing resource-related behavior of cattle appears necessary to improve the model.

Resumen

En Africa semi-árida, más que en otras partes del mundo, los sistemas de ganadería extensiva a menudo descansan en el pastoreo libre. Para controlar mejor su impacto sobre el medio ambiente y sus performances, necesitamos entender mejor su comportamiento espacial. Formulamos inicialmente la hipótesis que el comportamiento de los animales se puede influenciar moviendo de lugar puntos atractivos tales como pozos, corrales nocturnos o recursos forrajeros estratégicos en los pastizales, como zonas de pastos reservados o cercos vivos de forrajes. Para comprobar esta hipótesis, buscamos modelizar los circuitos. Estudiamos el comportamiento espacial y alimenticio de bovinos N'Dama, pastoreando el territorio de un pueblo en la parte sub-árida del Senegal, durante varios años. Según la estación (entre estación seca y estación de lluvias), el pastoreo es libre o bajo la vigilancia de un pastor. Los rebaños están atados por la noche y analizamos las características de los circuitos diarios. Predijimos duraciones de los circuitos diarios a lo largo del año con una función polinomial basada en días calendarios ($R^2 = 0.84$), las duraciones aumentando durante la estación seca. Propusimos explicar la evolución de las duraciones por variables climáticas, pero enseñamos que la introducción de estas variables para predecir las duraciones no mejoraría el modelo. Encontramos una diferencia en las distancias de desplazamiento diario entre los grandes (> 70 cabezas) y los pequeños hatos ($P < 0.001$) y entre la estación seca y de lluvias ($P < 0.001$). Una parte de las distancias de desplazamiento diario se explica por el alejamiento entre el corral de noche, donde el ganado esta atado durante la noche, y el punto de agua. Sin embargo, no es suficiente para predecir las distancias de desplazamiento diario ($R^2 < 0.42$). Según nuestras observaciones, identificamos tres fases de comportamiento alimenticio: pastoreo-desplazamiento (efecto del tamaño del hato $P = 0.07$, efecto de la estación seca vs. de lluvias $P < 0.001$, efecto interno a la estación seca $P < 0.001$, *promedio* = 68% de la duración del circuito para un año), desplazamiento (efecto del tamaño del hato $P = 0.07$, efecto de la estación seca vs. de lluvias $P < 0.001$, no efecto interno a la estación seca $P > 0.2$, *promedio* = 20% de la duración del circuito para un año), descanso (no efecto del tamaño del hato $P = 0.13$, efecto de la estación seca vs. de lluvias $P < 0.001$, efecto interno a la estación seca $P < 0.01$, *promedio* = 10% de la duración del circuito para un año). La actividad de pastoreo-desplazamiento abarca distintos niveles de intensidad de pastoreo. Luego aplicamos un análisis espacial gracias al método de tiempo residencia (RT). Analizamos las curvas de RT según las estaciones. Estas curvas deberían permitir analizar mejor y distinguir en los circuitos periodos de comportamiento alimenticio parcialmente homogéneo. Al mismo tiempo, probamos nuestra hipótesis central en un modelo espacializado agente-basado. ¿Que suficientes son factores abióticos para representar el libre pastoreo del ganado? Los elementos previos de descripción permiten avanzar en esta problemática, proporcionando factores para la conceptualización, la calibración y la validación. Desarrollamos una función de interés exponencial tiempo-dependiente, que aumenta la validez de las simulaciones. Pudimos encontrar distintas combinaciones interesantes en cuanto a las duraciones del circuito y las distancias de desplazamiento. Sin embargo, las simulaciones de los agentes bovinos no son totalmente satisfactorias. La introducción del comportamiento del ganado en relación con los recursos parece necesaria para mejorar el modelo.

Key words: N'Dama cattle, sub-humid rangeland, daily circuits, abiotic factors, modeling

INTRODUCTION

Rangeland managers and researchers examine for years pastoral systems of free-grazing herds in harsh environments (Bailey et al. 1996). Among ecologists and livestock scientists, aims are basically focused on environmental impacts, like the grazing effects on loss of resilience in harsh lands and/or animal performances. Biodiversity, habitats equilibrium or soil fertility transfer studies include grazing intensities or distributions as input factors (Adler and Hall 2005) and also

fire, climatic events (Westoby et al. 1989; Pickup et al. 1998; Fynn and O'Connor 2000; Illius and O'Connor 2000; Sharp and Whittaker 2003) and even matter fluxes (Manlay et al. 2002a, 2002b; Schlecht et al. 2006). Performances in harsh environments can be tackled by the study of animal productive potentials (Bosso et al. 2009), by its effect on the body condition dynamics (Ezanno et al. 2005), and also through feed supplementation trials (Sidibé-Anago et al. 2008). Dynamics of body conditions scores, also associated with livestock performances, can be statistically predicted through knowledge of herd structures and farmers' practices. However, this variable depends on the diet, the feeding efficiency (Henrique et al. 2005; Schlecht et al. 2007) and the daily walked distances (Dijkman and Lawrence 1997; Brosh et al. 2006). Like for environmental impacts of free-ranging activities, factors that are first of all relevant for performance analyses are therefore the dynamics of territory use by herds.

In that sense we refer to the article of Bailey et al. (1996) who set a methodological framework for spatial and feeding behavior of large ruminants. They proposed a model that simulates feeding sites selection. These authors choose to assign an intrinsic forage values to sites. Animals however do not automatically select sites with best values. There is a perceived value of the site which is the primary value deviated by constraints such as environment factors (e.g. slope) or animal characteristic (e.g. memory). Altogether, this can be formulated as the result of a choice from habitat attributes with other "external stimuli" (e.g. peers), with "internal stimuli" (e.g. thirst, hunger) and with "interpretive filters" (e.g. memory) (Launchbaugh and Howery 2005). This approach suggests two remarks: (1) in poorly referenced environments, as in harsh and heterogeneous lands, conferring intrinsic values to sites can be debated, particularly on the qualitative aspect, since the feeding values of forages species do exist (INRA 1989; Guerin 1999), but evaluating the site value according to a species community or a set of preferred species is even more difficult. (2) Effects of abiotic factors on spatial selection are evident. In particular, in semi-arid or sub-humid contexts, distance to watering points appears to have a preponderant effect on patterns of cattle distribution (Coppolillo 2000; Ganskopp 2001). This is why, in this study, we proposed to inverse the point of view of Bailey et al. (1996). In order to model daily cattle circuit, we hypothesized that it is more relevant to input abiotic factors (e.g. slope, water location) and day-linked variables (e.g. watering is a necessity) first, which may be further enriched by foraging constraints (e.g. site of interest for its feeding value). In a sense, it may be more parsimonious because it prevents from connecting all the state variables of such complex systems. The aim of this paper is to propose relevant main factors piloting daily circuits with minimum information on feeding resources in a context of free-ranging. In addition, this will prevent us from building a simplistic model, which relies on biased or correlated walking patterns that are included in the notion of "foraging goal" and that cannot ultimately be validated. For this we integrated artificial life methodologies applied to components of the system (multi-agents) and pertinent factors from the habitats ecology modeling. Altogether, we propose a renewed functional framework for the modeling of free-ranging livestock in complex environment under strong constraints.

1. METHODS

1.1. Study area

Local cattle herds were observed at daily steps on the village territory of Sare Yoro Bana, in the Kolda region, Casamance, south of Senegal (lat 12°49'N, long 14°53'W). The agropastoral territory is made of a mosaic of forest and savanna on the plateau, of savanna and crop fields on the glaciais and by the rainfed rice fields in the lowlands. The studied area is in West Africa, at the southern limit of Sahel. Sahel is the semi-arid belt of vegetation transition between Sahara and sudanian rangelands (Rietkerk et al. 1996). The Climate of the study area is rather sub humid (Sere et al. 1995) with an average rainfall of about 1 000 mm/year. Most of the soils, that are sandy or sandy loamy, undergo an irreversible adulteration, the lateritisation process, bound in chemical exchanges four to five times faster than under temperate climates. Those sandy soils or

Lixisols are very porous and the warm rain is a factor of high washing and oxidation. Tropical soils have a poor fertility besides a tiny humus quantity because of very high mineralisation rates. Lowlands have gley soils, anoxic, so that mineralisation of organic matter is highly reduced (Manlay et al. 2002a, 2004; Savadogo et al. 2007).

Peulh breeders of trypanotolerant N'Dama cattle (*Bos taurus*) cultivate moreover food-producing crops (millet, maize, sorghum) and cash crops (cotton, groundnuts). A cattle herder drives or supervises a family's herd from end of June to beginning of January, during the cropping season, ending with the late harvest of rice. Then cattle graze totally free on the village territory. Herds spend nights together tied-up, on a part of a field, so called night park. Night parks practice permit also to manure fields. The frequency of changing parks locations is generally of about three weeks.

1.2. Local climatic conditions

The climatic year encompasses a dry season, DS (from late October to early June) and a rainy season, RS. Average minimal and maximal temperatures are respectively about $T_{\min} = 19$ and $T_{\max} = 37^{\circ}\text{C}$ in DS and 24 and 33°C in RS. A thinner division of the year is however necessary to analyze livestock management variables. In published literature, previous segmentations in such environments were rather variable and clearly linked to study objectives. Most of the authors use rainy season, cool dry and hot dry season (Ezanno et al. 2003; Garine-Wichatitsky et al. 2004; Ezanno et al. 2005) with some variants: rainy, cold and dry season (Wang et al. 2005) or rainy, cool and dry season (Ouedraogo-Kone et al. 2006) or rainy, post-rainy and dry season (Sanon et al. 2007). A Peulh segmentation also exists: "Nduungu" (July-October) is the rainy season, "Yaamde" (October-November) corresponds to the last rains when the herds come back on cultivated fields, "Dabunde" (December-February), which is dry and cold, "Ceedu" (March-May) is the late dry and hot season, "Gataaje" (May-June) are the first rains of the year (Vall and Diallo 2009). We set the choice to consider an early dry season (EDS) from mid October to end of December, which corresponds to the come back with cattle herders on fields progressively harvested. Then, we term the time from January, start of the full free-ranging, to the beginning of March, when the rice straws left on the rice fields have almost been fully consumed, the mid dry season (MDS). At the end, the late dry season (LDS) comprises the warmest period until mid June when the rainy season (RS) starts. Schlecht et al. (2006) did the same segmentation for a study in West Niger.

For climatic variables we took ambient temperatures (T_{\min} and T_{\max}) recorded at the experimental station of Kolda, during the study. We also used timetables of sunrise and sunset given for Banjul (The Gambia) 170 km western and 60 km northern from our site thanks to a free calculator: Time and date© (<http://www.timeanddate.com/worldclock/sunrise.html>).

1.3. Data collection

1.3.1 General Organization. Elements of interest for our study fit into the large framework of agropastoral cattle feeding systems understanding. To catch the variability of cattle daily circuits it is necessary to conduct the study over several years, on several herds and through differenced seasons, which have to be characterized in bouts with relatively homogeneous daily patterns. Sampled herds were chosen basically because of their villager livestock representativeness according to size and to breeders practices criterions (Ickowicz and Mbaye 2001). Field measurements were undertaken over three consecutive years, on three herds of Sare Yoro Bana representing 50% of the village livestock. Following our study on variability of behaviors according to those three herds, we defined two classes: large (more than 70 animals) and small herds (up to 70 animals). Observations occurred each fortnight days, for three days, one per herd, from the departure of the night park to the mooring in the evening.

1.3.2. Daily organization of measures. On each observation day, departure and return time on the night park are recorded. In-between, observations occurred each five minutes and were

repered thanks to a GPS. Temporal activity of animals was also recorded. On rangelands cattle activities are depicted differently according to authors, i.e. observers do not always note in the same way the behaviors, even in similar breeding systems. For instance, in Niger, Ayantunde et al. (2001) considered seven activities, namely: prehension, masticating, searching for food (i.e. walking short during an intake bout), walking, resting, drinking and others. In Burkina Faso, Sanon et al. (2007) considered grazing, browsing (e.g. fruits, ligneous leaves), walking without feeding, resting, ruminating, drinking and others. Clearly, “searching for food” or “walking without feeding” stress a typical behavior that exists here too: cattle are quite continuously moving, even while grazing. On our side we also choose to separate activities into grazing while walking (more or less, on pastures or browsed resources: Gww), walking (without grazing: Wk), resting (Rs), ruminating and drinking. Observers determined every five minutes the percentage of animals in the herd for each activity. The watering point at the time cattle stopped and the time and place where breeders tie animals at the end of the circuit were also recorded.

1.3.3. Data processing. Circuits can be projected onto a map of the village territory constituted by homogeneous vegetation units, built from photo-interpretation of aerial pictures and ground studies on vegetation structures (Ickowicz and Mbaye 2001). Vegetation units are about one hectare wide in average. Circuits are characterized by their durations and walked distances. Observers made hypotheses, some from breeders’ assertions, on factors that affected daily durations and distances, other from knowledge of circuits.

Behavioral activities recorded on rangeland allow drawing up trends of animal repartitions at day to day scale but also at seasonal level. Activity Gww encompasses however a wide range of behaviors from a clear steady grazing to walks interrupted by grazing episodes. Hence we developed a specific methodology to objectively refine behaviors sequences through a spatial analysis within a given day through “residence time dynamics”. Our methodological purpose was (i) to aggregate activities in major types, which permits to analyse their distribution within circuits, (ii) to provide a tool for simulated circuits validation. In a first attempt, Etzenhouser et al. (1998) draw up the efficiency of ruminants with the fractal tools in order to compare trajectories of different species in a heterogeneous landscape. They assumed that fractal dimension is a relevant measure of tortuosity even though circuits are not fractal (Nams 2005). Hence this approach is still debated. Secondly, it is well recognized that the spatial structure of trajectories is often non uniform but composed of bouts, with deterministic or not, searches oriented or not (Benhamou 2004; Bartumeus et al. 2008).

In the reference paper of Benhamou (2004), we noted that homogeneous parts of trajectories could reliably be separated thanks to the Residence Time Method, which is an automatic circuit segmentation procedure. This method has been extensively described in Barraquand and Benhamou (2008). The residence time around a sampled point is the time spent by the herd in a virtual circle centered on this point, with the possibility to go out then to turn back after few steps. Hence this method requires getting a step value and a circle radius and, moreover, a maximum number of steps to achieve the residence time calculation, once going out of a circle. As recommended (S. Benhamou, personal communication, February 2009) we chose a circuits rediscrétization with a constant step length of 40 m which is the rounded minimum median value of the distance between two sampled points, considering all breeders, all seasons. Furthermore, as the circle radius should equal 4 steps lengths (as recommended), we took it at 160 m. We analyzed the sensibility of the signal according to parameters values. It is by rule of thumb that we chose the circle radius and the out circle authorization, 3 step lengths, i.e. 120 m. Finally, Residence Time (RT) data for each circuit were obtained thanks to the algorithm of Barraquand and Benhamou (2008), computed with an open-source program in FreePascal (www.freepascal.org). Then, we built a mobile average algorithm in order to segment the RT series into homogeneous bouts in term of average and variance. All RT data that encompassed into a homogeneous bout (i.e. into RT mobile average + $K \times$ RT mobile standard deviation) were affected within the respective moving average, in order to aggregate and clarify the segmentation.

We warned not to lose too much variability on RT through the K value choice (by rules of thumb: 1.8). We obtained RT curves for 116 circuits along the four parts of the year (EDS, MDS, LDS, RS), for both herd size (large $n = 59$, and small $n = 57$). We then draw up a typology of daily homogeneous RT bouts, with a not normalized principal component analysis (PCA) and a hierarchical cluster analysis based on a selection of the first four PCA's coordinates of circuits (Chessel et al. 2004). The agglomeration method chosen is the Ward's minimum variance method. Each RT curve from a circuit is individual and variables are calculated RT for each minute of the daily circuit. We chose to divide circuits durations at the smallest scale we can, in order to avoid defining groups of homogeneous bouts *a priori*. This global approach allowed describing the observed variability intra- and inter-season. All statistical analyses were done under R (R Development Core Team 2009).

1.3.4. Modeling free-ranging cattle agents. We built a preliminary spatialized agent-based model developed with Cormas (Bousquet et al. 1998). To conceptualize potential decision rules of cattle, choosing locations on the territory, we kept only three abiotic factors involved in the herd choices according to our central hypothesis. Hence, we developed a command "walk ahead" (through the next step depending on the angle with the previous, conveying a least angular deviation trend, called factor 1) because observers noted that directions of herds, daily, were encompassed in a cone of $\pm 45^\circ$ during 78% of the circuit duration, in average ($n = 436$). In addition we developed a factor 2 "closest distance" (between the current position and the next location, conveying a classical and relevant rule of optimal foraging). But how to compel the herd to pass by the watering point and to go back to the night park? Bailey et al. (1996) showed constraint functions of patch slope and distance from water. These mechanical functions are factor multipliers, contained between 0 and 1, to adjust the site choice. We contributed to develop a similar function, for watering points and night parks (slope is not a constraint in our area). This driving function (DF), normalized, is formalized as follows:

$$\text{DF} = \exp. [a \times (\text{time step} - \text{start time}) / (\text{watering time} - \text{start time})] / \exp. [a], \text{ before watering} \\ = \exp. [a' \times (\text{time step} - \text{start time}) / (\text{stop time} - \text{start time})] / \exp. [a'], \text{ after watering} \quad [1]$$

DF is a time-based exponential function. Coefficients "a" and "a'" have to be determined by rules of thumb. DF is coupled up with the factor 3 "distance from a vegetation unit to the next facility". Vegetation units have a score depending on their distance to the next facility. DF is varying across the time: mute at start time, it contributes with an increasing weight in the decision process of unit choice. Also factor 3 is put off at the departure from a facility then step by step emphasized. All factors are normalized between 0 and 1 but, thanks to DF, factor 3 can confer scores exceeding 1, also prevailing over the other factors. Modelers have to calibrate time cattle passing to watering point and to night park. Factor "walk ahead" is weighted positively, the two other factors based on distances are weighted negatively: the higher distances are, the smaller scores are. All factors are normalized (values from 0 to 1).

The grazed territory is about 20 km² wide. Herds look really to know all the area. They can join different vegetation unit more or less close to the night park, because they know they will find crop residues or even just some localized attractive trees with limited senescent fruits on the ground. We also assumed they have a complete extensive perception or memory (i.e. omniscient agents). Specialists recognize that it is necessary to foresee different levels of movement reaction, at the herd scale (Bailey et al. 1996; Dumont and Hill 2004; Mueller and Fagan 2008). From our experience, a herd moves first of all to join some area, at a vegetation unit scale: the watering point or a good quality site, what is in agreement with studies about association between resource quality and location (Bailey and Sims 1998). This level is called navigational. There is also a lower level, more local. This search-related level is quite difficult to link with the resource characteristics, at the herd scale. Once the next vegetation unit selected, cattle agents will join this vegetation unit by selecting a path through discretized vegetation sites, components of vegetation

units. For parsimony, we integrated the same three factors in the decision rules for the local choice.

Herds are passing daily at the watering point. Hour of watering depends on the season but is quite constant a given season. The time spent at the watering point is very brief and looks quite constant along the year, which is convenient with measurements in other parts of sub-humid West Africa (Ouedraogo-Kone et al. 2006). In this preliminary model, we simulated one day of free-grazing, with a step of 5 min. There are three agents, leader cows of three herds. Conditions are close to those of the mid of the dry season. Start time is fixed at 09:30 hours, watering time at 13:00 hours, circuit duration should be about 9 h and stop time should be 18:40 hours. (1) First agent is located at the initialization on a night park on a cropped field close to the watering point, on the rice field (distance: 359 m). (2) Second agent has the night park on a cropped field farther of the same watering point (distance: 1.7 km). Case (1) is typical of a small herd. Case (2) is typical of a large herd. Third agent is a non realistic agent which night park is settled far in the forest, then very far from the same watering point (2.3 km) for this territory. But this last case should stimulate discussion about the behavior of our abiotic factors. On the other hand, we had informations on the average herd speed according to the different activities (non published data: from 0.1 to 1 km/h for Gww and more than 3 km/h for Wk). We converted those speeds in maximal discretized sites possibly traveled for a step (5 min). Agents can then choose among a limited number of sites at a given step. If the amount of traveled sites is small, simulated activity is Gww, else Wk. Gww and Wk are therefore emergent activities from the modeling process. On the contrary, we calibrated time when agents are stopped on a site (i.e. Rs activity): at the watering point (one step) and short before the theoretical end of the day on the range.

An agent is first oriented by the breeder for a vegetation unit, at start time, after the model initialization. Then, when the agent is arriving on this unit, the scheduler calculates a score for the 315 units of the territory. The unit with the best score is selected. The formula is a linear combination of the three factors: $w_1 \times \text{factor 1} + w_2 \times \text{factor 2} + w_3 \times \text{factor 3} \times \text{DF}(a \text{ or } a')$ where w_i is the weight from 0 to 1 (absolute value) of the factor i . At the local scale, the formula is exactly the same. We fixed a and a' at 3. We conducted 115 simulations. We used model outputs as timing, walked distances, circuit durations, proportion of activities Gww and Wk, RT and graphical circuits to analyse this preliminary model.

2. RESULTS

2.1. Durations, starting and ending times of daily circuits

Daily circuits durations (Dur) were calculated as difference between ending (Stop) and starting (Start) times. Through a linear model with least squares method estimation of parameters (Table 1) we neither found a year ($P = 0.12$) nor a herd-size ($P = 0.56$) effect.

Table 1. Estimations of parameters in a linear polynomial degree 4 ($R^2 = 0.84$), for the best model of fitting circuits durations.

parameter	estimate	standard error	P -value (parameter = 0)
intercept	9.0	0.2	$< 2 \times 10^{-16}$
day	-5.6×10^{-2}	0.8×10^{-2}	8×10^{-12}
day ²	8.9×10^{-4}	0.9×10^{-4}	$< 2 \times 10^{-16}$
day ³	3.4×10^{-6}	0.4×10^{-6}	$< 2 \times 10^{-16}$
day ⁴	3.9×10^{-9}	0.5×10^{-9}	6×10^{-14}

We then superimposed all duration data on a yearly base, positioning each point on its calendar day. Our convention is to begin the year on the 1st of October, this date corresponding

roughly to the end of the rainy season. This calendar model (Fig. 1) is validated thanks to recent measurements done in 2008 ($n = 30$, $R^2 = 0.92$). We note a strong evolution along the year, with an amplitude of four hours.

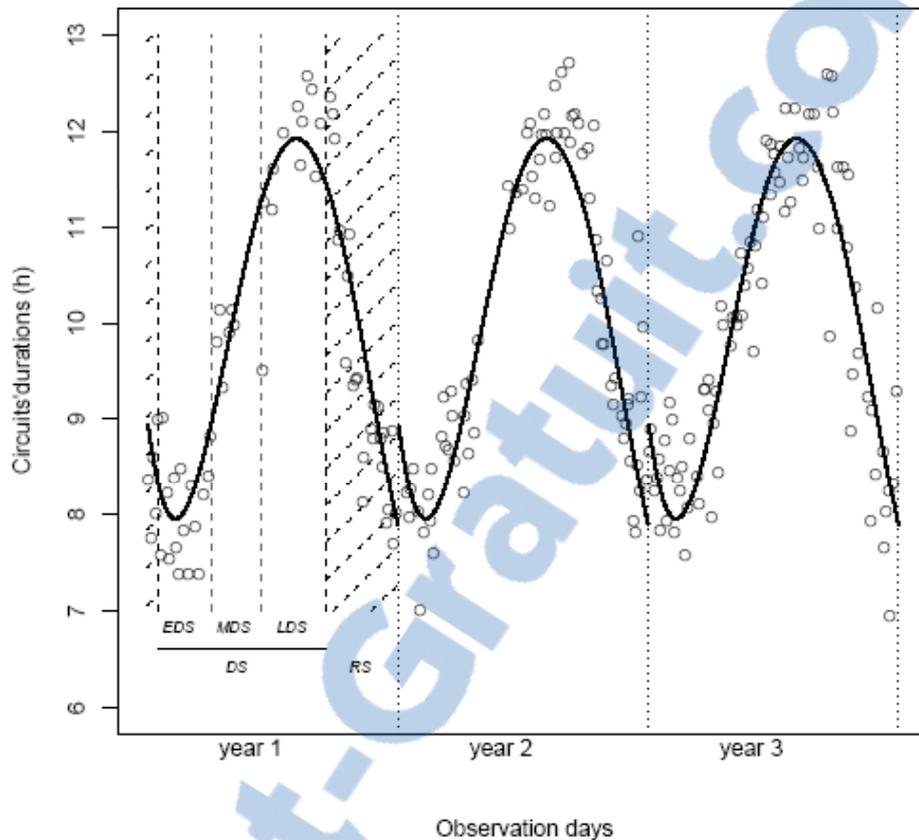


Figure 1. Predicted values (curve) and observed values of daily circuits durations as a function of calendar days ($n = 227$, $R^2 = 0.84$). The amplitude during the dry season (DS), divided in early (EDS), mid (MDS) and late dry season (LDS) is high, about four hours, before the rainy season (RS). We noted that our year segmentation is relevant: extrema of durations occur at the EDS and the LDS and transitions at the MDS and the RS. As the annual model was obtained by the superimposition of all observations undertaken during 3 years, the discontinuity of curves corresponds to the predicted values initialization.

In order to determine the effective variables that may explain the annual variations of Dur, we tested the effects of Start and Stop through the R^2 of regressions: $R^2 = 0.94$ for the regression on Dur function of Start. $R^2 = 0.77$ for the regression between Dur and Stop. Hence daily circuits durations depend more on the time herds leave the night park, in the morning, than on time they come back.

We wondered whether it was possible to estimate Start and Stop through prevailing photoperiod and ambient temperatures. Start depends on practices (e.g. when milking of cows ends). Breeders assert that milking vary according to time of sunrise and/or prevailing ambient temperatures. We also analyzed the statistical description of Start by minimal temperature (T_{\min}) and sunrise, within the DS ($n = 127$) and the RS ($n = 100$). Besides, breeders tell that Stop corresponds to the need of finishing binding cattle before night. We then analyzed the statistical description of Stop by sunset.

The time cattle leaved the night park (Start) was not significantly affected by years ($P = 0.24$ for the DS and $P = 0.16$ for the RS) and, within the DS. So was the herd-size effect ($P = 0.87$), but it has an effect during the RS ($P = 0.02$) when herds are herded. Hypotheses that day to day photoperiod or climatic variables affected Start (e.g. sunrise and T_{\min}) seemed to be realistic

($P < 0.01$), but they did not satisfactorily explained Start (sunrise: $R^2 = 0.41$ and 0.68 , T min: $R^2 = 0.49$ and 0.30 , respectively in DS and RS).

Final daily stops (Stop) were neither affected by year effect ($P = 0.52$ for the DS and $P = 0.54$ for the RS) nor by herd size ($P = 0.16$ for the DS and $P = 0.84$ for the RS). Here again, the photoperiodic variable (e.g. sunset) affected Stop ($P < 0.01$) but explanation was not confirmed: $R^2 = 0.76$ and 0.40 , respectively in DS and RS. We noted however that the assertion of sunset effect on Stop is particularly relevant, in DS.

2.2. Daily walked distances

There is not a simple relationship between distance and duration due to various behavioral activities within a day. As for durations, there is no year effect on walked distances ($P = 0.38$). However, herd size has a significant effect (Fig. 2). Large herds ($n = 122$ circuits), made of more than 60 mature cows, moved significantly more ($P < 0.01$) than smaller herds of about 20 mature cows ($n = 59$ circuits), 7.6 km / day vs. 5.4 km / day in average on a year, respectively.

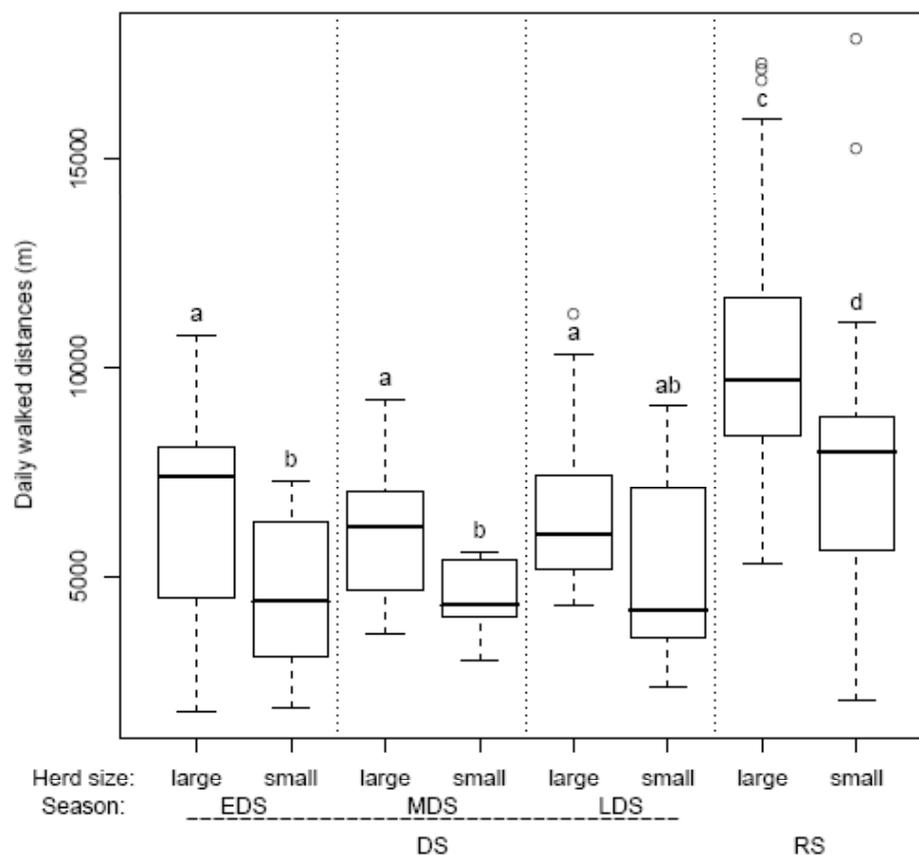


Figure 2. Daily walked distances distribution according to herd size (small, 20 mature cows vs. large, more than 60), season (early dry -: EDS, mid dry -: MDS, late dry -: LDS, which compose the dry season: DS, and rainy season: RS), along three years of observation. For RS, herders drive cattle on long distances, mainly through forest, far away from crop fields: there is a significant difference between DS and RS (t -test, corrected by the Bonferroni P -value method). In LDS, circuits tend to get longer, mainly because of scarcity of resource. That is statistically stressed for the small herd.

We subsequently analyzed the potential effect of length of a straight line from the night park to the watering point used on daily walked distances. Indeed, we were expecting for a clear daily distances extension along with DS because of an obvious resources decrease. Statistically (Fig. 2), there is no evidence of this connection. This assertion drove naturally to this hypothesis : distance between the night park and the watering point used is a major constraint, and also a good indicator of daily walked distances. We found however no significant differences on distances

between night park and watering point ($P = 0.18$) amongst herds, at the year level. A confusing factor is that breeders use to move their parks every three weeks. More precisely, there is, however, a strong and significant effect of season: during LDS, when ambient temperatures are higher and resources lower, correlation linking the distance from night park to watering point with the daily walked distance is then clear ($P < 0.01$, $n = 23$). It is also observed during RS ($P < 0.01$, $n = 38$), when the herder drive their cattle to ponds and prevent them to enter the fields. But that was not the case for EDS ($P = 0.45$, $n = 22$) and MDS ($P = 0.71$, $n = 11$). Another confusing factor is the resource availability in EDS and MDS: crop residues are particularly abundant so that herds have to walk less than in LDS, on scarce resources. To summarize, the daily walked distance depends more or less on the distance between the night park and the watering point, but on breeders' practices and resource availability too. Then, even if there are significant correlations, the prediction of walked distances from the length between night park and watering point is not satisfying: percentages of explained variance (i.e. R^2) equal 0.42 (LDS) and 0.30 (RS), but can even be lower than 0.1 (EDS and MDS). Our previous result on the impact of watering point location on the total walked distance is not precluded but is only valid in given seasons and taking into account breeders practices and feed resources availability.

2.3. Cattle activities on rangeland

As stated before, animal activities were allocated into four categories, namely grazing (or browsing) while walking (Gww), walking (Wk), resting (Rs), and lastly ruminating or drinking.

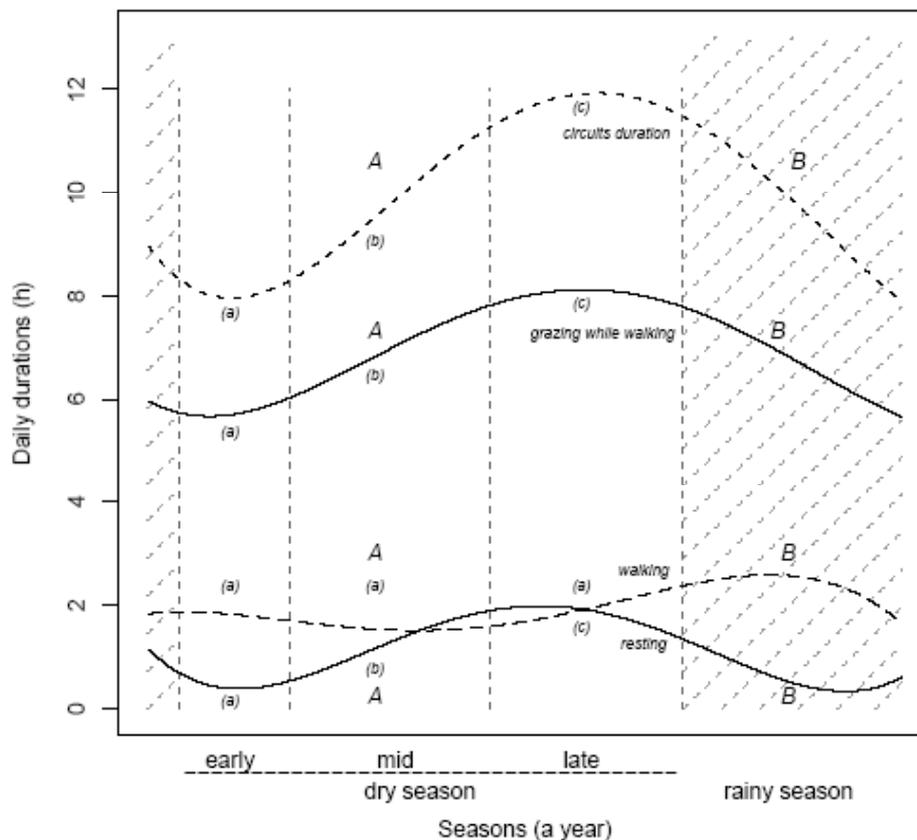


Figure 3. Evolution of activities on rangeland, compared to the daily durations dynamic along the year. Data are fitted by a 4th order regression polynomial model. Based on averages comparisons (t -test), walking activity is quite constant during the dry season (a). On the contrary, grazing while walking and resting activities follow the daily durations trend (a, b, c significantly different $P < 0.01$). Especially, during the lengthening of daily durations, resting bouts are increasingly long. Differences are significant (A, B) between dry and rainy season ($P < 0.01$).

As discussed later ruminating and drinking were very brief and even not observed during the day, for ruminating. On overall database, we found a significant year ($P < 0.01$) and herd-size effect ($P = 0.07$) for Gww. Such effects were confirmed for Wk: significant effects of year ($P = 0.04$) and of herd-size ($P < 0.01$). Large herds walk more than small, which spend more time for Gww. For Rs activity, we neither found a year ($P = 0.76$) nor a herd size effect ($P = 0.13$). Repetitiveness of Rs activity, according to year and herd may be related to climatic evolution along with seasons. For instance, from EDS to MDS, Rs time is increasing (Fig. 3) and Rs bouts occur just at the end of the circuit; cattle waiting for being tied. In addition, during LDS, all herds stop in the afternoon because of the strong solar irradiation. For the three activities, there is a significant ($P < 0.01$) difference between DS and RS. Even within DS, we found a clear difference between EDS, MDS and LDS for Gww and Rs, but not for Wk. We assume that Wk is basically used to join the watering point or the night park and to arrive on time. That would explain its constancy along DS. Finally we proposed averages and standard errors of these activities: $68 \pm 12\%$ for Gww, $20 \pm 8\%$ for Wk, $10 \pm 8\%$ for Rs, while ruminating and drinking are negligible at day-scale.

Hence the main activity, Gww, remains confusing since it tallies to a continuum of behaviours. It is composed of a variable part of intake and movement. Indeed, it can consist of intense grazing bouts when movements are almost nil. This often happens on the crops straws, during EDS and MDS, with abundant forage availability. This recalls the so-called large meal (Jarrige et al. 1995), for zebu cattle grazing on sahelian steppes in north Senegal. On the other side, however, we observed numerous short grazing bouts (from a second up to ten seconds bouts) inside long moving bouts. This being mostly observed during LDS.

2.4. Interest of the concept of Residence Times (RT)

As described above, we carried out a spatial analysis of cattle locations along the day in order to better characterize their circuits. This should permit to refine the daily activities segmentation (grazing while walking: Gww, walking: Wk and resting: Rs). We obtained RT curves. The PCA result indicates that variability is linked to season but not so much to herd size (Fig. 4).

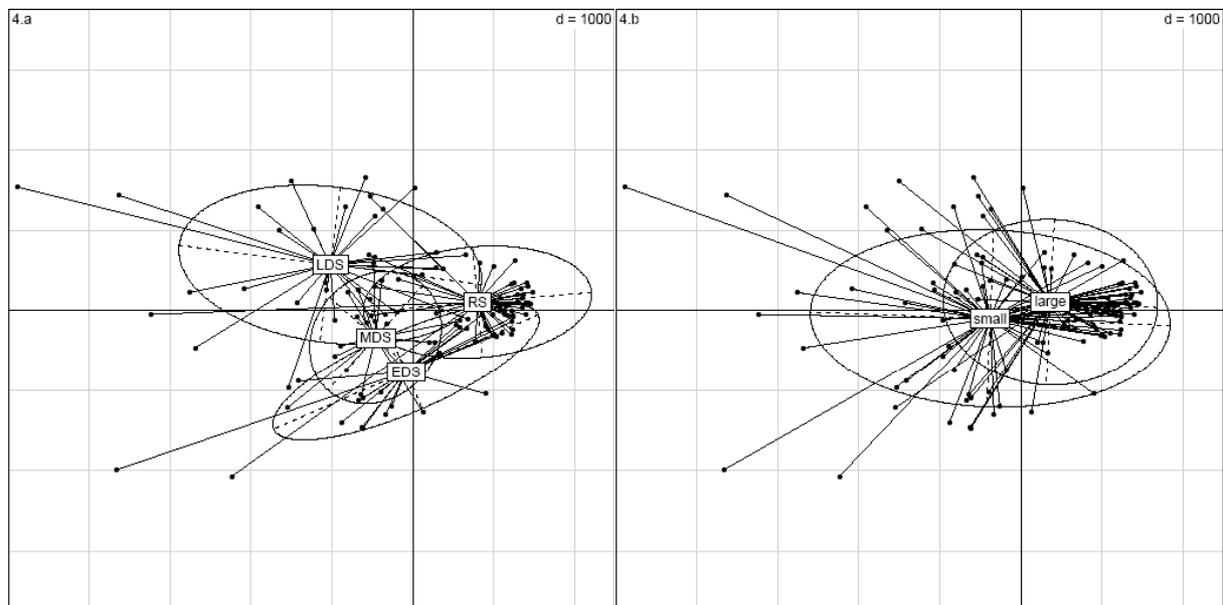


Figure 4. PCA results on the residence time values for each minute of every single circuits, projected on the factorial plan, built with the two first principal components. Plotted points are daily circuits ($n = 116$). PCA is a way to show synthetically, variability of circuits. Ellipses centers are averages of RT for each minute of circuits, determined as belonging to a same group. Those are represented according to season (early dry-: EDS, mid dry-: MDS, late dry-: LDS and rainy season: RS, 4.a) and herd-size (4.b). In order to distinguish circuits variability but clustering too, per season or per herd-size, each plotted point (i.e. circuit) is linked by a segment to the center

of associated group (i.e. at the average of the points variability). Confidence ellipses encompass 99% of circuits for a given group.

Large herds are quite always tied far from the kernel village and are mostly oriented to start by browsing in the forest. Compared to small herds, large herds circuits vary less along seasons. In a modeling approach however, we suggest not to distinguish different-sized herds with RT analyses. At each season, we separated circuits into three classes according to a hierarchical cluster analysis. Curves (Fig. 5) are the average of RT curves of the class aggregating the most circuits, per season. We set segments to propose relatively homogeneous bouts.

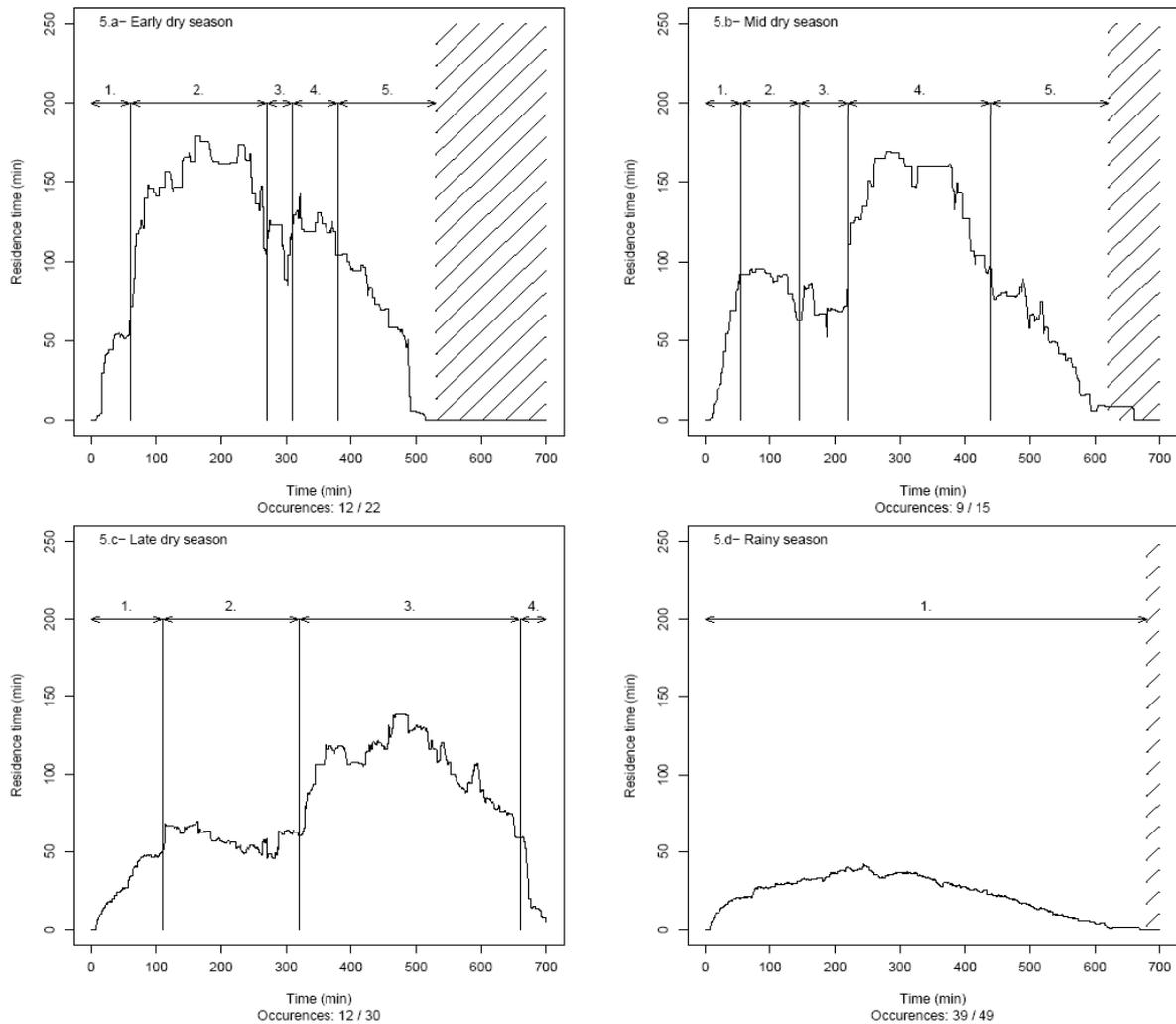


Figure 5. Average curves of daily circuits RT. The four seasons previously defined (5.a- early dry, 5.b- mid dry, 5.c- late dry, and 5.d- rainy) are represented. Total no. of circuits and no. of circuits used for the RT average per season are notified. Hatched areas begin when cattle are tied up at the night park (RT is zero in hatched areas).

The major interest of this RT method is to have a non-subjective insight on effective Gww in connection with the units of vegetation encountered by animals. In that sense, during EDS (Fig. 5.a), when herds are supervised by herders on the cropped areas, most of circuits can be divided into five major bouts. The first bout (1) would be a rapid step corresponding to leaving the night park. Then (2), herds are gathered on millet, maize or groundnuts crops and on fresh fallows. At this step, as RT is high, Gww is more dedicated to grazing and less walking. This coincides with the most important meal on crop residues, which occurs short after leaving. The following step (3) is a transition bout where Wk activity and watering occur. Then (4), herds turn back to the

cropped area or stay on the rice field. In any case, lower RT indicates a higher mobility than in the morning, which may mean another type of Gww. Finally (5), we can see the bout where herds go back to the night park.

During MDS (5.b), after the departure (1), we isolate again a first long meal (2) in the morning. Herds are on fallows or in clear forest parts. But, after watering (3), the most important meal occurs on the rice field (4). Basically, the RT decrease in this step ensues from time cattle spend to join the watering point, by walking. The final bout (5) corresponds to a slow travel back to the night park, passing by the pastures under the palmgrove. During LDS (5.c), RT are lower than observed at any other parts of DS. Because of scarce resource, the activity Gww include more walking. At this season, rice straws have been almost completely consumed and rice field is colonized by gramineous regrowths. Herds finish sooner or later to stabilize themselves on these regrowths. According to the RT curve, in average, it occurs at the step 3.

RS is different (5.d). The activity Gww is clearly a walk dominant activity. All is as if the herder drives all the day his herd through several areas in the forests. This corroborated the higher seasonal circuit length. The RT method can also help to gather the qualitative knowledge of the spatial behavior of herds on different parts of the territory. If so, RT, activities, walked distances and circuits durations become objective tools to analyse the validity of an agent-based model. Especially because a superimposition of described variables is not an efficient mean. Although we already found that a factor of forage availability seems to be necessary, we tested the model based on factors of herd attraction linked to facilities in accordance with our main hypothesis.

2.5. Modeling herds' movements with a driving function (DF)

We searched for tackling three key points: (1) how simulations respond to each abiotic factors, and particularly, what is the influence of factor 3 "distance from a vegetation unit to the next facility", including DF? (2) How the two scales of decision (navigational vs. local) interact one on another? We have to discuss this element of conceptualization. (3) Finally, what are the consequences for validity of simulated circuits? We had to link this point with (1) and (2), because successful simulations depend on the sensibility of the model to the combinations of factors. Are those interesting combinations robust regarding each agent?

We first tested the nine possible combinations considering navigational with local levels of decision, where only one factor is maximally weighted (i.e. 1 in absolute value), others being null: navigational ($w_1 = 1, w_2 = 0, w_3 = 0$) and local ($w_1 = 0, w_2 = 1, w_3 = 0$) then navigational ($w_1 = 1, w_2 = 0, w_3 = 0$) and local ($w_1 = 0, w_2 = 1, w_3 = 0$) and so on, with w_i the weight's absolute value of factor i (see Modeling free-ranging cattle agents, METHODS). Each case was repeated five times. When the combination was the same in the navigational and in the local function, we had elements for the key point (1). Weighting alone on the decision processus, factor 1, "walk ahead", leads to a selection of a vegetation located in a limited cone in the direction of the agent. With the factor 2, "closest distance", agents tend to stay on their current location, but agents never pass by the facilities. Thanks to the factor 3, agents reach first the watering point then the night park. Factor 3 is not sufficient *per se*. Too strong, it drives directly agents to facilities, with a circuit duration of less than 3 h.

Those nine combinations give moreover elements for the key point (2). When the navigational combination differs from the local combination, the local decision rules are of prime importance: indeed, the local function is the mainspring of moving. For instance, in the case of navigational (0,0, w_3 at 1) and local (0, w_2 at 1, 0), the agent will select the rice field, which contains the watering point, as the vegetation unit to reach (navigational). It will then choose its current site (local) at each step and will never reach the selected vegetation unit. To approach the key point (3), we decided to apply the same weighting for both levels of decision, navigational and local, for each simulation. Fourteen combinations were done, each repeated five times. The pixelized map of the simulated territory and the time-based outputs for each combination are shown on Fig. 6.

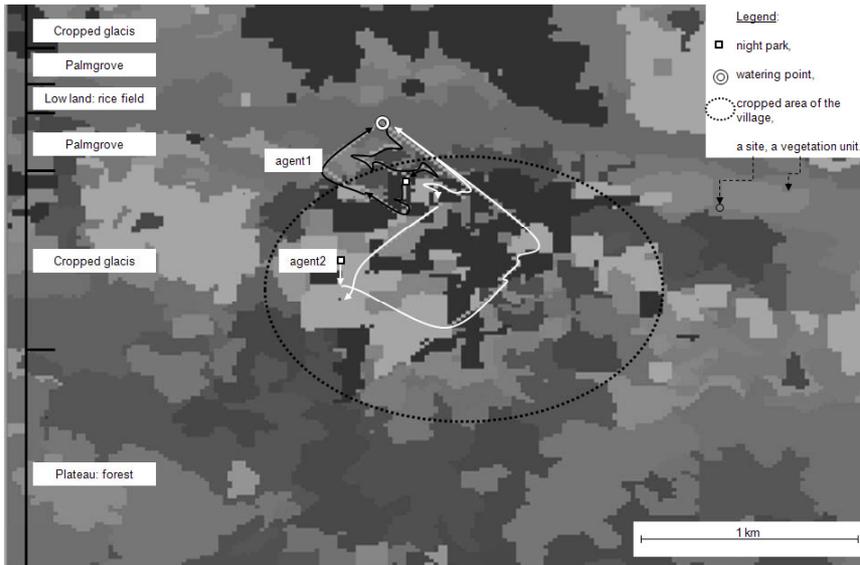
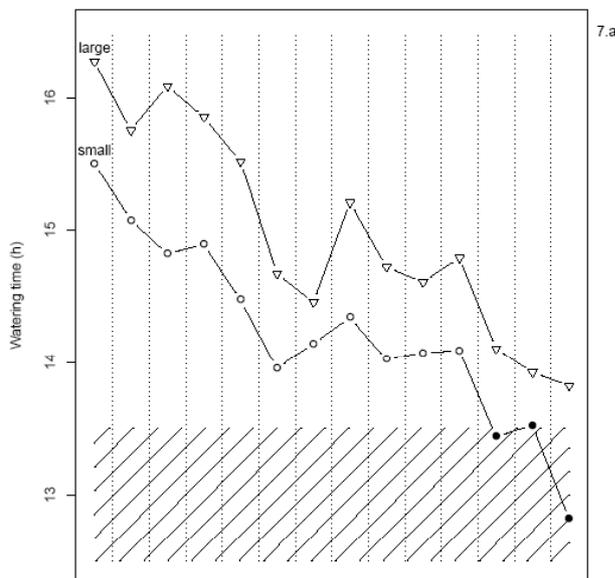
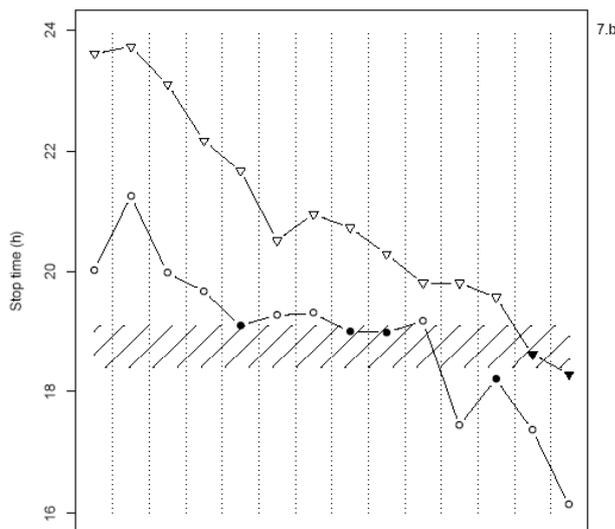


Figure 6. Caption of the pixelized map of the village territory used as environment for three free-ranging cattle agents. Circuits illustrated for agent 1 (small herd-like: “small”) and agent 2 (large herd-like: “large”) result from the combination of 3 abiotic factors of orientation choice.



7.a

Figure 7. barplot-like graphs of time-based outputs, emergent of 14 sets of simulations. Segments linking points facilitate the reading: but the x-axis is not numerical and continuous but represents basically a decreasing value of factors 1 and 2, while factor 3 remains constant. Factor 1 is a “walk ahead” command. Factor 2 is a “closest distance” command. Factor 3 is the distance from a vegetation unit to the next facility, including an internal weight, so called “drive function”. Each point is the average value of results of five simulations. Points in the same column, on 7.a and 7.b, correspond to the same set of those five simulations. In a set, the two represented agents run orientation decisions according to a given combination of three abiotic factors (bottom of 7.b in column). Time values for watering time (7.a) and stop time (7.b) are compared to the real values observed on the field (dotted area).



7.b

On Fig. 7, we show times of watering (7.a) and of walking back to the night park (7.b), simulated by the model for agents 1 and 2. Simulated values result from a certain combination of the three abiotic factors, their weights being given on.

factor1: -1.00 | -0.75 | -1.00 | -0.75 | -0.50 | -0.25 | -0.50 | -0.40 | -0.35 | -0.34 | -0.33 | -0.25 | -0.20 | -0.15
 factor2: 1.00 | 1.00 | 0.75 | 0.75 | 0.50 | 0.50 | 0.25 | 0.40 | 0.35 | 0.34 | 0.33 | 0.25 | 0.20 | 0.15
 factor3: -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00 | -1.00

After Fig. 7, we propose four principal conclusions. (1) Scores attributed to locations by factor 3 vary according to time but not to agent. Nevertheless, there is an effect of the distance between night park and watering point. Agent 1 (small herd) joins earlier the next facility than agent 2 (large herd). Agent 3 is always very late. Indeed, even if the agents select a facility as next objective to join, agent 1 has less distance to travel. (2) Factor 3 must be enough weighted to be on time to facilities. Combination (-1, 1, -1) suppresses its potential force. On the other side, as already noted, factor 3 has to be counterbalanced: see combination (-0.15, 0.15, -1) for agent 1. (3) Factor 1 and factor 2 do not have the same effect on timing. A heavier weight for factor 1 tends to increase the walked distance. From one simulation to another, in the same set, successive directions of the agents can differ because factor 1 gives almost the same scores to locations encompassed in a directional cone. Also the combination (-0.75, 1, -1) regarding (-1, 1, -1) is better on the watering time criterion but not for the circuit ending. Qualitatively, regarding the combinations (-0.75, 1, -1) and (-1, 0.75, -1), then (-0.25, 0.5, -1) and (-0.5, 0.25, -1), we noted that differences between weights of factors 1 and 2 do not strongly affect time-based outputs, but more walked distances and visited sequences of vegetation. (4) Previous conclusions ask the question of parameters robustness. Using the three abiotic factors, the best combination would change according to the distance from night park to watering point: (-0.25, 0.25, -1) for agent 1 and (-0.15, 0.15, -1) for agent 2. Those combinations were used to obtain, respectively, the circuits illustrated on Fig. 6. Then, only a sensitivity analysis will permit to better analyse these results together, with biotic factors.

Simulated circuits distances and activities may not be good discriminators to compare one combination to another. The distances results are all satisfying: measured daily distances in MDS conditions are comprised between 4.0 (1st quartile) and 5.4 km (3rd quartile), for the small herd, and between 4.5 and 7.0 km for the large herd (cf. Fig. 2). All combinations induce simulated distances comprised between 3.0 and 4.8 km for agent 1, and between 4.4 and 6.4 km for agent 2. Gww and Wk observed values in MDS (cf. Fig. 3) are, respectively, in the intervals [56%, 80%] and [12%, 28%], for both herds. Simulated Gww are in the interval [79%, 98%] for agent 1 and in [85%, 92%] for agent 2. Simulated Wk are in the interval [2%, 21%] for agent 1 and in [8%, 19%] for agent 2. Gww are particularly overestimated. Besides, RT curves of circuits obtained by (-0.25, 0.25, -1) for agent 1 and (-0.15, 0.15, -1) for agent 2 are similar to an average of RT curves determined for observed circuits in MDS. On Fig. 4.a, projection of this simulated circuits on the PCA two first axes are located between ellipses of EDS and MDS.

3. DISCUSSION AND MANAGEMENT IMPLICATIONS

The aim of this work is to set a realistic framework of parameters from this ecological system. Those are necessary to do relevant analyses of conceptualized factors of foraging theories elaborated on field observations. Clearly, the distribution is not ideal and free (Moody and Houston 1995; Jones et al. 2006). The optimal foraging can not be formalized only like a resource preference (Farnsworth and Beecham 1999). It may be useful to have indicators like ours to achieve or precise validation steps.

3.1. Reasoning the setting parameters in a free-ranging cattle model during the dry season

3.1.1. Circuits durations. We propose a simple and robust model for daily durations of cattle circuits, without any year or herd-size effects. Indeed, this model is coherent with the increment of circuits durations observed on other dry areas, between EDS to LDS or until the beginning of RS: in central Nigeria (Bayer 1990), in western Niger (Schlecht et al. 2006), or in the Ferlo region, central Senegal (unpublished). For modeling daily durations of free-ranging cattle we have shown that it is possible to estimate Start and Stop time through prevailing photoperiod and ambient temperatures: this being particularly efficient for Stop time in DS ($R^2 = 0.76$). Doing so, uncertainties on Start and Stop prediction will introduce variability when simulating daily G. Chirat, 2009.

duration circuits. Moreover, this is not as parsimonious as using directly our calendar model of circuit daily durations. If such a calendar model does not explicitly include external cues it includes implicitly breeders practices related to climatic conditions. We interpreted that cattle departure from the night park, in the morning, depends on both sunrise timing and ambient temperature: the more cold, or later the sun rises, later breeder milks cows and untie them.

3.1.2. Walked distances. We specify that subgroups of the herd often split after leaving the night park, introducing variability in the daily walked distance. Such a behavior was previously described (Reinhardt 1981). Even if groups moved on their own, they tended to gather at watering points and at the end of the circuit, hence explaining that duration of the daily circuit was relatively well explained, contrary to distances. We did not try to understand the effects of animal composition of groups. They have been described as mostly matriarchal structures (Bouissou and Boissy 2005) or as composed of animals of similar age (Harris et al. 2007). We are not able to determine whether this might have consequences on estimated walked distances.

Besides, we expected a clear increment of daily distances along with DS because of an obvious tendency toward feed resources scarcity. This trend is only significant for the small herd ($P < 0.1$). This means that whatever the influence of biomasses availability on circuits distances, the given distance between the night park and the watering point is a major constraint. This is confirmed by differences observed between large and small herds: large herds being generally tied farther from watering points, walk more than small herds. Coppolillo (2000) searched for an indicator of the free-ranging area, for zebu cattle in the Rift valley. He calculated daily maximal lengths traveled from the initial camp. He found a good explanation of these distances by lengths between the camp and the watering point: $R^2 = 0.81$. This study is in agreement with our observations. As shown however, length of a straight line between night park and watering point is not sufficient to predict precisely daily walked distances.

3.1.3. Activities on rangeland. Activities segmentation is the intuitive way to distinguish different homogeneous bouts of a circuit. Resident time (RT) method gives a more robust way to this analysis. Proportions of activities are then a validation tool to analyse circuits simulations. It is worthwhile noticing that we almost never have observed cattle ruminating while ranging. This activity occurred only during resting times, at least by the end of the day before the tie, but it was rare. Explanation may be that animals spent at least 12 hours a day tied up. So they might search for intake as much as possible and ruminate at night. Drinking was difficult to separate from resting times at each season, and drinking durations were limited to a few minutes.

We noted that a large herd walked more than a small one. On Gobra zebus, in the Ferlo region in the senegalese Sahel, we found the same tendency (unpublished). Coppolillo (2000), on zebu cattle in the Rift valley, also observed that larger herds walked more while actively foraging. As far as we know, proposed explanations stem from social aspects. For the Rift valley study, the author assumed there are always a few individuals walking from their current position to another. This may lead close individuals to move too. Whatever the equilibrium between cooperation and competition (Parsons and Dumont 2003), it seems reasonable to consider the more individuals, the more social weight on spatial selections and movements.

3.1.4. From circuits description to circuits conceptualization. The Range manager may list some entities which appear necessary to model herd movements: herd, herder, night park and watering points, vegetation. With a previous circuits description, he can expect to develop some simple behavioral rules, with the modeler. Manager and modeler have to discuss of the vegetation entity. Conceptually, the modeler can also assume that the circuit results from a biased (e.g. attraction to a point at the navigational scale) correlated (e.g. not random local walk at the local scale) random (e.g. maximal simplification hypothesis) walk, but he should not consider a simpler hypothesis.

3.2. What is the interest of our free-ranging cattle model?

First interest is to discuss methodological aspects of thinking about an experiment plan. The researcher or the manager both have to analyze step by step descriptive factors and correlations among them, beginning with the simpler, more synthetic state variables. That is what we did here. If in the past it was difficult to follow herds on a territory and also to characterize visually spatial behavior, nowadays, thanks to GPS and activities recorders it may be more feasible. Those technologies were tested to study activities on rangeland (Ungar et al. 2005), herd social structure (Harris et al. 2007), and behavior faced to abiotic (Ganskopp et al. 2000) or biotic components of the territory (Schlecht et al. 2006). As a first step, validation procedures should be able to answer satisfactorily to the following questions concerning simple characteristics of the circuits: did the herd reach on time the attractive points (first watering point and finally the night park)? Are the daily durations of the circuit in agreement with observations obtained at a given season? What are the daily walked distances? Then, we have other elements to be validated: animal activities, residence time sequences and visited vegetation units.

We conclude about our simulations results that the three abiotic factors, while relevant, are not sufficient *per se*. The validation step have to take into account resource-based elements too. Is it relevant to speak about robustness of factors combinations without vegetation-based factors? Decision rules on vegetation might put off differences between agent 1 and agent 2 under a same combination. We showed that the factor 3 “attraction to the next facility” has to be strongly weighted. Adding other factors on vegetation traits will better counterbalance the effect of factor 3. We also think that the sensitivity analysis can not be reliably done if all factors, abiotic and biotic, are not integrated. This is why we did not proceed yet to such an analysis.

CONCLUSION

On the sub-humid territory of Sare Yoro Bana, south of Senegal, we observed N'Dama cattle feeding behaviors at a daily scale, in order to analyse at last animal performances and impact on the rangeland. Describing daily circuits' characteristics allows us to model those circuits. We hypothesized that it is possible to monitor herds by some attractive points locations like wells, night parks, or strategic forage resources on the range, like fenced areas, forage hays. Consequently, calibrating circuits' characteristics and abiotic factors may be sufficient to model circuits. We also proposed a description of several circuit state variables. Circuits durations continuously increase from the early dry season (EDS) to the late dry season (LDS), from about 8 h to 12 h. Daily durations are easy to record as cattle are tied during night. If we were able to satisfactorily represent the duration dynamics into a statistical model, we were not able for daily walked distances. Durations and distances are not simply correlated: within the dry season (DS), walked distances are not significantly different from a day to another. Large herds being generally tied farther from watering points walk more than small herds. Using the Residence Time (RT) method (Barraquand and Benhamou 2008), we isolated different phases of feeding behavior, necessarily interpretable through the knowledge of activities on rangeland (e.g. grazing while walking, walking, retting). RT sequences allowed to refine those activities.

Daily circuit durations, walked distances, activities proportions and RT method all belong to a validation set, to be compared with those variables simulated. We also carried out a simplified model with three criteria for spatial orientation: walking ahead, walking close distance from one point to another, and converging to the watering point or backward to the night park. We showed that a time-dependant exponential function is necessary to be on time at the watering point and at the night park, and to simulate realistic walked distances and circuits shapes. But this function was not sufficient *per se*, even added with the two other abiotic factors. Indeed, resource biomasses and their attributes appear to be important entities to be integrated in the model in order to simulate the cattle spatial behavior more accurately. Resource attributes are necessary since the final aim of the model is to approach animal intakes and performances.

ACKNOWLEDGMENTS

We extend thanks to S. Benhamou at the CEFE-CNRS Montpellier for methodological support and advices, and to Daniel Babène at the senegalese institute for agriculture and villagers of SareYoro Bana for their welcome and for technical aspects. We also gratefully acknowledge C. Aubron (Montpellier SupAgro) for spanish subtitles.

LITERATURE CITED

- Adler, P. B., and S. A. Hall. 2005. The development of forage production and utilization gradients around livestock watering points. *Landscape Ecology* 20:319-333.
- Ayantunde, A. A., S. Fernandez-Rivera, P. Hiernaux, H. van Keulen, H. M. J. Udo, and M. Chanono. 2001. Effects of timing and duration of grazing of growing cattle in the West African Sahel on diet selection, faecal output, eating time, forage intake and live-weight changes. *Animal Science* 72:117-128.
- Bailey, D. W., J. E. Gross, E. A. Laca, L. R. Rittenhouse, M. B. Coughenour, D. M. Swift, and P. L. Sims. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management* 49:386-400.
- Bailey, D. W., and P. L. Sims. 1998. Association of food quality and locations by cattle. *Journal of Range Management* 51:2-8.
- Barraquand, F., and S. Benhamou. 2008. Animal movements in heterogeneous landscapes: identifying profitable places and homogeneous movement bouts. *Ecology* 89:3336-3348.
- Bartumeus, F., J. Catalan, G. M. Viswanathan, E. P. Raposo, and M. G. E. da Luz. 2008. The influence of turning angles on the success of non-oriented animal searches. *Journal of Theoretical Biology* 252:43-55.
- Bayer, W. 1990. Behavioural compensation for limited grazing time by herded cattle in central Nigeria. *Applied Animal Behaviour Science* 27:9-19.
- Benhamou, S. 2004. How to reliably estimate the tortuosity of an animal's path: straightness, sinuosity, or fractal dimension? *Journal of Theoretical Biology* 229:209-220.
- Bosso, N. A., E. H. van der Waaij, K. Agyemang, and J. A. M. van Arendonk. 2009. Genetic parameters for growth traits in N'Dama cattle under tsetse challenge in the Gambia. *Livestock Research for Rural Development* 21. Available at: <http://www.lrrd.org/lrrd21/3/boss21033.htm>. Accessed 5 April 2009.
- Bouissou, M.-F., and A. Boissy. 2005. Le comportement social des bovins et ses conséquences en élevage. *INRA Productions Animales* 18:87-99. (in French)
- Bousquet, F., H. Bakam, H. Proton, and C. Le Page. 1998. Cormas : Common-pool resources and multi-agents systems. In: International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Castellon, Spain. p 826-837.
- Brosh, A., Z. Henkin, E. D. Ungar, A. Dolev, A. Orlov, Y. Yehuda, and Y. Aharoni. 2006. Energy cost of cows' grazing activity: Use of the heart rate method and the Global Positioning System for direct field estimation. *Journal of Animal Science* 84:1951-1967.
- Chessel, D., A.-B. Dufour, and J. Thioulouse. 2004. The ade4 package -I- One-table methods. *R News* 4:5.
- Coppolillo, P. 2000. The Landscape Ecology of Pastoral Herding: Spatial Analysis of Land Use and Livestock Production in East Africa. *Human Ecology* 28:527-560.
- Dijkman, J. T., and P. R. Lawrence. 1997. The energy expenditure of cattle and buffaloes walking and working in different soil conditions. *The Journal of Agricultural Science* 126:95-103.
- Dumont, B., and D. R. C. Hill. 2004. Spatially explicit models of group foraging by herbivores: what can Agent-Based Models offer? *Animal Research* 53:419-428.
- Etzenhouser, M. J., M. K. Owens, D. E. Spalinger, and S. B. Murden. 1998. Foraging behavior of browsing ruminants in a heterogeneous landscape. *Landscape Ecology* 13:55-64.
- Ezanno, P., A. Ickowicz, and F. Bocquier. 2003. Factors affecting the body condition score of N'Dama cows under extensive range management in Southern Senegal. *Animal Research* 52:37-48.

- Ezanno, P., A. Ickowicz, and R. Lancelot. 2005. Relationships between N'Dama cow body condition score and production performance under an extensive range management system in Southern Senegal: calf weight gain, milk production, probability of pregnancy, and juvenile mortality. *Livestock Production Science* 92:291-306.
- Farnsworth, K. D., and J. A. Beecham. 1999. How do grazers achieve their distribution? A continuum of models from random diffusion to the ideal free distribution using biased random walks. *American Naturalist* 153:509-526.
- Fynn, R. W. S., and T. G. O'Connor. 2000. Effect of stocking rate and rainfall on rangeland dynamics and cattle performance in a semi-arid savanna, South Africa. *Journal of Applied Ecology* 37:491-507.
- Ganskopp, D. 2001. Manipulating cattle distribution with salt and water in large arid-land pastures: a GPS/GIS assessment. *Applied Animal Behaviour Science* 73:251-262.
- Ganskopp, D., R. Cruz, and D. E. Johnson. 2000. Least-effort pathways?: a GIS analysis of livestock trails in rugged terrain. *Applied Animal Behaviour Science* 68:179-190.
- Garine-Wichatitsky, M., H. Fritz, I. Gordon, and A. Illius. 2004. Bush selection along foraging pathways by sympatric impala and greater kudu. *Oecologia* 141:66-75.
- Guérin, H. 1999. Valeur alimentaire des fourrages cultivés. In: G. Roberge and B. Toutain [eds]. Cultures fourragères tropicales. CIRAD. p 93-145. (in French)
- Harris, N. R., D. E. Johnson, N. K. McDougald, and M. R. George. 2007. Social associations and dominance of individuals in small herds of cattle. *Rangeland Ecology & Management* 60:339-349.
- Henrique, D. S., R. A. M. Vieira, P. A. M. Malafaia, M. C. Mancini, and A. L. Gonçalves. 2005. Estimation of the total efficiency of metabolizable energy utilization for maintenance and growth by cattle in tropical conditions. *Revista Brasileira de Zootecnia* 34:1006-1016.
- Ickowicz, A., and M. Mbaye. 2001. Forêts soudaniennes et alimentation des bovins au Sénégal : potentiel et limites. *Bois et forêts des tropiques* 270:47-61. (in French)
- Illius, A. W., and T. G. O'Connor. 2000. Resource heterogeneity and ungulate population dynamics. *Oikos* 89:283-294.
- INRA. 1989. Ruminant nutrition. Recommended allowances and feed tables. R. Jarrige [ed]. INRA and John Libbey Eurotext Paris, France, London, England.
- Jarrige, R., Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.-H. Farce, and M. Journet. 1995. Nutrition des ruminants domestiques : ingestion et digestion. INRA [ed], Paris, France. (in French)
- Jones, O. R., J. G. Pilkington, and M. J. Crawley. 2006. Distribution of a naturally fluctuating ungulate population among heterogeneous plant communities: ideal and free? *Journal of Animal Ecology* 75:1387-1392.
- Launchbaugh, K. L., and L. D. Howery. 2005. Understanding Landscape Use Patterns of Livestock as a Consequence of Foraging Behavior. *Rangeland Ecology & Management* 58:99-108.
- Manlay, R. J., J.-L. Chotte, D. Masse, J.-Y. Laurent, and C. Feller. 2002a. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna: III. Plant and soil components under continuous cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88:249-269.
- Manlay, R. J., A. Ickowicz, D. Masse, C. Feller, and D. Richard. 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.
- Manlay, R. J., D. Masse, J.-L. Chotte, C. Feller, M. Kaire, J. Fardoux, and R. Pontanier. 2002b. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna: II. The soil component under semi-permanent cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88:233-248.
- Moody, A. L., and A. I. Houston. 1995. Interference and the ideal free distribution. *Animal Behaviour* 49:1065-1072.
- Mueller, T., and W. F. Fagan. 2008. Search and navigation in dynamic environments - from individual behaviors to population distributions. *Oikos* 117:654-664.
- Nams, V. O. 2005. Using animal movement paths to measure response to spatial scale. *Oecologia* 143:179-188.

- Ouedraogo-Kone, S., C. Y. Kabore-Zoungrana, and I. Ledin. 2006. Behaviour of goats, sheep and cattle on natural pasture in the sub-humid zone of West Africa. *Livestock Science* 105:244-252.
- Parsons, A. J., and B. Dumont. 2003. Spatial heterogeneity and grazing processes. *Animal Research* 52:161-179.
- Pickup, G., G. N. Bastin, and V. H. Chewings. 1998. Identifying trends in land degradation in non-equilibrium rangelands. *Journal of Applied Ecology* 35:365-377.
- [R] R Development Core Team. 2009. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reinhardt, V. 1981. Cohesive relationships in a cattle herd (*Bos indicus*). *Behaviour* 77:121-151.
- Rietkerk, M., P. Ketner, L. Stroosnijder, and H. H. T. Prins. 1996. Sahelian rangeland development; a catastrophe? *Journal of Range Management* 49:512-519.
- Sanon, H. O., C. Kabore-Zoungrana, and I. Ledin. 2007. Behaviour of goats, sheep and cattle and their selection of browse species on natural pasture in a Sahelian area. *Small Ruminant Research* 67:64-74.
- Savadogo, P., L. Sawadogo, and D. Tiveau. 2007. Effects of grazing intensity and prescribed fire on soil physical and hydrological properties and pasture yield in the savanna woodlands of Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118:80-92.
- Schlecht, E., P. Hiernaux, I. Kadaoure, C. Hulsebusch, and F. Mahler. 2006. A spatio-temporal analysis of forage availability and grazing and excretion behaviour of herded and free grazing cattle, sheep and goats in Western Niger. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 113:226-242.
- Schlecht, E., H. Richter, S. Fernandez-Rivera, and K. Becker. 2007. Gastrointestinal passage of Sahelian roughages in cattle, sheep and goats, and implications for livestock-mediated nutrient transfers. *Animal Feed Science and Technology* 137:93-114.
- Sere, C., H. Steinfeld, and J. Groenewold. 1995. World livestock production systems. FAO Animal Production And Health Paper, LEAD, Roma, Italy.
- Sharp, B. R., and R. J. Whittaker. 2003. The irreversible cattle-driven transformation of a seasonally flooded Australian savanna. *Journal of Biogeography* 30:783-802.
- Sidibé-Anago, A. G., G. A. Ouedraogo, and I. Ledin. 2008. Effect of season and supplementation during late pregnancy and early lactation on the performance of Zebu cows and calves. *African Journal of Agricultural Research* 3:640-646.
- Ungar, E. D., Z. Henkin, M. Gutman, A. Dolev, A. Genizi, and D. Ganskopp. 2005. Inference of Animal Activity From GPS Collar Data on Free-Ranging Cattle. *Rangeland Ecology & Management* 58:256-266.
- Vall, E., and M. A. Diallo. 2009. Savoirs techniques locaux et pratiques : la conduite des troupeaux aux pâturages (Ouest du Burkina Faso). *Natures Sciences Sociétés* 17 :122-135. (in French)
- Wang, S.-J., C. Lengeler, T. Smith, P. Vounatsou, D. Diadie, X. Pritroipa, N. Convelbo, M. Kientga, and M. Tanner. 2005. Rapid urban malaria appraisal (RUMA) I: Epidemiology of urban malaria in Ouagadougou. *Malaria Journal* 4:43.
- Westoby, M., B. Walker, and I. Noy-Meir. 1989. Opportunistic management for rangelands not at equilibrium. *Journal of Range Management* 42:266-274.

Conclusions partielles

Cette thèse s'inscrit dans un cadre de recherche-action d'évaluation de la durabilité des systèmes agropastoraux en zones sèches, finalisé dans l'intégration des performances individuelles des bovins aux circuits quotidiens des troupeaux. Une phase expérimentale de terrain nous a d'abord permis d'étudier les processus d'ingestion sur le parcours, présentée dans le chapitre 1. Dans un deuxième temps, nous avons plus spécifiquement décrit les circuits (temps et distances parcourues quotidiennement, activités sur parcours, temps de résidence) et observé le rôle des aménagements (parcs de nuit et points d'eau) dans la structuration de ces circuits. Nous avons alors testé l'hypothèse selon laquelle il est possible de représenter le comportement spatial et alimentaire des troupeaux bovins dans un modèle orienté agent, en faisant réagir les agents Troupeaux uniquement à des facteurs non liés à la végétation. Cette option vient du fait (1) qu'il a été montré que la prise en compte de facteurs abiotiques, tels que la position du point d'eau, est nécessaire dans la représentation du système divagant (Bailey et al. 1996, Ganskopp 2001) et, (2) qu'il est parcimonieux de limiter le nombre de facteurs interagissant dans le modèle. Les principaux résultats de description des circuits et une synthèse des choix et des résultats du modèle, présentés dans l'article ci-avant, sont explicités ci-après.

1. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES DESCRIPTEURS DES CIRCUITS DES TROUPEAUX DE N'DAMA SUR PARCOURS AGROPASTORAL SAHELO-SOUDANIEN

1.1. Temps de parcours journaliers

Sur le territoire villageois de Saré Yoro Bana, région de Kolda, les temps de parcours sur l'année ont pu être ajustés par un modèle linéaire ($R^2 = 0,84$). Il semble, en première analyse, que les temps de parcours soient influencés par l'amenuisement progressif des ressources végétales au cours de la saison sèche. Mais ce n'est pas la corrélation la plus pertinente. L'analyse des corrélations entre temps de parcours et heures de départ et de retour au parc de nuit, puis avec des variables climatiques de lever et coucher du soleil, ainsi que de températures, a montré que les temps de parcours sont plus dépendants des heures de départ des animaux ($R^2 = 0,94$) que des heures de retour au parc de nuit ($R^2 = 0,77$). L'interprétation avancée est que les éleveurs tiennent surtout à terminer l'attache avant la tombée du jour, dont l'amplitude est faible, d'une heure trente environ. En revanche, l'amplitude des heures de départ est plus large. Elle dépend strictement de l'heure à laquelle l'éleveur termine la traite. Statistiquement, nous avons mis en évidence des corrélations plus ou moins fortes entre heures de départ et heures de lever du soleil et températures ambiantes minimales. Ces corrélations étaient toutefois en accord avec les dires des éleveurs : en saison sèche froide (début à milieu de saison sèche), les éleveurs tardent à aller à la traite, alors qu'en saison chaude (fin de saison sèche et saison des pluies), le lever du jour plus tôt leur permet d'aller à la traite aux premières heures du jour, plus fraîches.

Un deuxième temps d'analyse nous a donc permis d'estimer que les temps de parcours sont d'abord déterminés par les pratiques des éleveurs. C'est pour cela que le modèle calendaire des temps de parcours apparaît satisfaisant, avec moins d'erreurs en tout cas qu'un ajustement *a priori* plus fin à des variables de l'environnement ou climatiques.

1.2. Distances parcourues quotidiennement

Les distances parcourues n'ont pas pu être ajustées simplement. Trois résultats majeurs sont à retenir. (1) Il y a toujours un effet marqué de la taille du troupeau sur les distances parcourues ($P < 0,05$, sauf en fin de saison sèche : $P < 0,10$). (2) Les circuits ont tendance à s'allonger du début de la saison sèche jusqu'à l'apparition de la saison des pluies. Statistiquement, au sein de la saison sèche, cette évolution n'est toutefois pas nette. En effet, tout se passe comme si les animaux sur le territoire villageois avaient l'habitude de faire à peu près toujours les mêmes circuits, très

répétables par période de saison sèche. Il n'y a donc pas de lien trivial entre distances parcourues et disponibilités de la ressource végétale à l'échelle du territoire. (3) Les troupeaux à plus grand effectif sont globalement attachés plus loin du point d'abreuvement que les petits troupeaux. Nous pensions que l'éloignement entre parc de nuit et point d'eau expliquait largement ces différences significatives des distances parcourues entre petits et grands troupeaux. C'est faux : $R^2 < 0,42$. Comme les éleveurs changent l'emplacement du parc de nuit régulièrement au cours de la saison sèche, il est probable que cet effet soit alors atténué. En outre, cela laisse penser que c'est l'orientation initiale donnée par l'éleveur au troupeau qui est de prime importance sur l'origine de l'effet troupeaux sur les distances parcourues. Il y a donc bien un point commun entre temps de parcours et distances parcourues : ces deux variables d'état des circuits sont très dépendantes des conduites des éleveurs.

1.3. Activités des bovins sur parcours et temps de résidence

La mobilité des troupeaux de N'Dama sur ces terres de parcours limite les phases de pâturage où les animaux restent stables sur un couvert végétal donné, au sein d'une journée. Comparés aux troupeaux de zébus Gobra en zone pastorale plus au nord, qui profitent d'un pâturage nocturne, il est probable que le temps limité du parcours (maximum 12 h par jour, en fin de saison sèche) accentue cet enchevêtrement entre pâturage et déplacements. Nous proposons des valeurs journalières moyennes de ces activités : $68 \pm 12\%$ pour l'activité de pâturage-déplacement, $20 \pm 8\%$ pour l'activité de déplacement simple, et $10 \pm 8\%$ pour l'activité de repos, alors que la rumination et l'abreuvement sont négligeables à l'échelle de la journée. Au sein de la saison sèche, en particulier, les activités de pâturage-déplacement et de repos augmentent en durée, suivant l'évolution des temps de parcours, alors que les temps de déplacement simple restent plutôt stables ($P > 0,05$). Qualitativement, les phases de repos qui augmentent avec la saison sèche semblent liées à l'augmentation de la température ambiante moyenne. En outre, les grands troupeaux ont tendance à se déplacer davantage sans pâturer que les petits ($P < 0,01$). Il est possible que cette activité de déplacement plus importante soit liée à la distance parcourue quotidiennement plus longue : l'activité de déplacement seul est généralement observée quand le troupeau quitte une aire explorée pour rejoindre un aménagement. En ce qui concerne la liaison jusqu'au point d'eau, nous avons remarqué que la distance parcourue depuis l'aire précédemment explorée jusqu'au point d'eau est plus importante, et que les troupeaux mettent alors plus de temps, au cours d'une période donnée. Une seconde explication avancée est que la compétition étant relativement plus forte au sein d'un grand troupeau, les animaux sont plus mobiles (Coppolillo 2000).

La description des activités permet de mieux comprendre la structure des circuits quotidiens des animaux. Toutefois, nous avons remarqué que la mobilité des troupeaux entraîne une grande diversité de comportements au sein des phases de pâturage-déplacement. Pour mieux cerner les phases de pâturage, stables, et les périodes de « cueillette » ou de déplacement, nous avons utilisé la méthode des Temps de résidence (Benhamou 2004, Barraquand and Benhamou 2008). Cette méthode nous a permis d'une part de segmenter objectivement les circuits en fonction d'un comportement alimentaire évalué comme homogène et, d'autre part, de disposer d'un outil objectif d'évaluation des comportements alimentaires spatialisés simulés.

L'analyse des trajectoires observées ne s'est pas limitée à l'utilisation de la méthode des Temps de résidence, ou à l'enregistrement des heures de passage aux aménagements. Nous avons pu établir également la déviation angulaire moyenne des troupeaux au cours de la libre pâture : $\pm 45^\circ$ pendant 78% de la durée d'un circuit, en moyenne ($n = 436$). C'est ce que nous avons nommé le principe de la « marche en avant ». En outre, qualitativement, tout se passe comme si les différentes aires d'alimentation exploitées défilaient dans un processus continu de déplacements de proche en proche, jusqu'au prochain aménagement rejoint. Cela rend compte du rôle très structurant des aménagements dans l'orientation générale des bovins, déviés de proche en proche par la ressource rencontrée.

2. REPRESENTATION ET ANALYSE DU SYSTEME DIVAGANT PAR UN MODELE MULTI-AGENT SIMPLIFIE

Les suivis des troupeaux N'Dama dans la zone agropastorale sahélo-soudanienne ont permis pour partie de définir certains facteurs pouvant intervenir dans la règle de choix de déplacement et d'ingestion sur le parcours, ainsi que des critères d'analyse des circuits simulés. En outre, les suivis effectués sur le territoire pastoral sahélien plus au nord, exploité par des zébus Gobra, laisse présager des difficultés à transposer simplement le modèle développé à partir des suivis des N'Dama. En effet, les différences marquées de l'environnement dans ces zones agroécologiques distinctes sont une première contrainte. De surcroît, nous avons insisté sur l'impact modéré mais bien réel des modes de conduites sur les caractéristiques des circuits, mais aussi sur les processus d'ingestion. L'attache est sans doute la caractéristique la plus prégnante du système représenté. Même si elle ne semble pas générique lorsqu'on la transpose aux zébus du Nord Sénégal, il existe toutefois de très nombreux systèmes divagants où les animaux sont claustrés pendant la nuit, généralement en zones soudanienne (Ouedraogo-Kone et al. 2006, Sanon et al. 2007). En zones plus arides, sahéliennes, il est fréquent qu'un pâturage nocturne existe, selon les périodes de l'année (Ayantunde et al. 2001, Sanon et al. 2007).

2.1. Théories du comportement spatial et alimentaire des ruminants

Dans l'objectif de comprendre et de représenter les choix alimentaires spatialisés de troupeaux bovins, les observations sur parcours s'enrichissent des théories du comportement des animaux. Nous avons considéré les principales théories qui formalisent généralement les choix sous forme heuristique. Le recours à une heuristique est une approche pragmatique pour représenter un système complexe.

La réponse des ruminants aux contraintes perçues dépend de l'échelle considérée (Ungar 1996). A l'échelle du territoire, les naturalistes ont formulé différentes théories causales des déplacements en recherche de nourriture. Nous revenons sur trois théories d'intérêt. (1) La théorie de la Répartition idéale et libre (« Ideal and free distribution »), élaborée initialement en 1970, détermine les choix alimentaires spatialisés d'agents équivalents, omniscients quant à la quantité et la qualité des ressources sur un territoire, et sans contraintes d'ordre social ou non-alimentaire dans leurs déplacements. L'environnement est hétérogène d'un point de vue des ressources, et les agents cherchent à atteindre les zones où leurs vitesses d'ingestion seront les plus fortes (Moody and Houston 1995, Jones et al. 2006). C'est au départ un modèle spatialisé de dynamique des déplacements de prédateurs dans un environnement hétérogène de proies. (2) La théorie des Jeux (« Game theory »), élaborée initialement en 1944, est une voie de rationalisation des choix d'agents par la prise en compte de coûts et de bénéfices de l'expression des choix possibles de déplacements. Cette théorie est implémentée dans un formalisme mathématique rigoureux et recherche les stratégies optimales de choix d'orientation dans un environnement, favorisant les chances de survie et le succès reproducteur (ou « fitness »). Par exemple, un agent cherche à s'alimenter dans un environnement hétérogène. Il dispose de plusieurs comportements stéréotypés distincts, pouvant être hiérarchisés au départ de manière aléatoire. C'est-à-dire qu'il agit préférentiellement par certains comportements plutôt que d'autres. Il a donc une certaine probabilité de choisir la meilleure zone de l'environnement pour son fitness. Cela peut être la zone lui conférant la vitesse d'ingestion la plus forte. En fonction de la zone effectivement choisie à l'instant $t - 1$, et de l'impact sur son fitness, l'agent va modifier sa hiérarchie de comportements préférés, modifiant ainsi la probabilité de rejoindre la zone jugée meilleure à t (Anderson 2002). Cette théorie prend en compte le fait que les agents ne réagissent pas simplement à la ressource, en termes de quantité ou de qualité, mais aussi à des contraintes non-alimentaire, telles que la socialité, les risques de prédation, ou des stimuli physiologiques, ou bien encore des facteurs abiotiques (pentes, présence d'un point d'eau). (3) La théorie de l'Alimentation optimale (« Optimal foraging theory », OFT) est un autre cortège d'hypothèses cherchant à rationaliser les choix alimentaires spatialisés des animaux. C'est un cadre théorique qui prédit le comportement

d'un individu omniscient, au départ (Pyke 1984, Roguet et al. 1998). Mais des études successives ont permis d'enrichir les heuristiques de prévision de l'orientation des ruminants, par l'affinement de l'omniscience en capacités mémorielles (Hirvonen et al. 1999), par une prise en compte de la socialité dans les choix (Parsons and Dumont 2003, Ramseyer et al. 2009b), et par l'utilisation différente de l'espace selon les zones d'alimentation, de repos ou d'abreuvement (Bailey 2005), entre autres. En outre, selon les espèces d'herbivores, des auteurs ont cherché à déterminer si les stratégies de choix de déplacement sur le territoire dépendaient plutôt de la biomasse disponible, appelée stratégie « time minimizing », ou d'un compromis entre biomasse disponible et qualités nutritionnelles du couvert, appelée stratégie « energy maximizing », ou encore de la présence, de l'absence ou de la proximité d'un aménagement, appelée stratégie « null foraging » (Bergman et al. 2001, Adler and Hall 2005, Edouard et al. 2009).

Nous venons d'exposer succinctement trois théories du comportement alimentaire d'agents, à l'échelle d'un territoire. Aux processus de mémorisation, nécessairement imparfaite de l'environnement, ce qui est généralement le cas des agents simulés (Ferber 1995), nous avons préféré l'omniscience de la théorie de la Répartition idéale et libre (1). D'une part, c'est une simplification maximale, en accord avec le principe de parcimonie. D'autre part, cela permet aux agents bovins d'avoir une carte réaliste du territoire, avec une actualisation de l'évolution du stock. Nous pensons qu'en progressant par stade de complexification, la programmation d'items mémoriaux floutés, par exemple, est une sophistication, de fait non prioritaire dans l'étude.

Les théories de rationalisation des choix (2 et 3) nous ont confortés sur deux points, eu égard aux observations de terrain. Il existe des facteurs « d'économie » des déplacements : c'est le cas des facteurs de marche en avant et de moindre distance à parcourir. En outre, il existe des activités non liées à l'ingestion : c'est en accord avec le facteur abiotique d'attraction aux aménagements. Ces trois facteurs, non liés à la ressource, sont les premiers intégrés dans une règle de choix des aires du territoire de libre pâture.

2.2. Rappels sur la première étape de modélisation

Nous avons émis l'hypothèse qu'il est possible de modéliser les interactions entre troupeaux et parcours en n'intégrant que des facteurs non liés à la végétation. L'environnement est issu d'un SIG. Les conditions initiales sont un départ pour tous les agents à 9h30, un passage attendu au point d'eau vers 13h00, et un retour au parc de nuit après 9h environ de parcours, soit autour de 18h40. Cette initialisation intègre les observations préalablement décrites dans l'article ci-avant. L'attraction aux aménagements successifs est permise grâce à une sous-fonction du facteur abiotique d'attraction aux aménagements, formalisée telle qu'elle fut développée par Cambier et al. (2005). La fonction de décision est une combinaison linéaire de trois facteurs de choix, globalement comme localement. Trois agents, i.e. des entités troupeaux ont été implémentés. A l'initialisation, le premier agent (agent 1) est positionné sur son parc de nuit dans la zone cultivée du glacis, très proche du point d'eau situé sur la rizière à cette période (distance : 359 m). L'agent 1, par la localisation de son parc de nuit, représente un petit troupeau, tel qu'il fut défini dans la présentation de la zone d'étude. Le deuxième agent (agent 2) part d'un parc de nuit également sur le glacis cultivé, mais relativement éloigné du point d'eau (distance : 1,7 km). Cet agent représente un grand troupeau. Une troisième itération d'agent (agent 3) part d'un parc de nuit sur le glacis forestier, très loin du point d'eau (distance : 2,3 km). C'est une situation hypothétique qui n'existe pas sur la zone d'étude.

Cette première version a eu pour objectif de répondre à trois questions majeures : (1) les déplacements des agents en situation de choix sont-ils en accord avec ce que détermine chaque facteur non lié à la végétation, (2) comment s'articulent les déplacements déterminés globalement et localement, et (3) peut-on obtenir des simulations des circuits de troupeaux valides, vu les conditions initialisées de l'environnement des agents, par ces trois facteurs non liés à la végétation ? Si oui, il s'agit logiquement de hiérarchiser l'importance des facteurs dans le processus des choix valides. Pour répondre à ces questions, nous avons procédé en deux temps distincts. Nous avons d'abord « éteint » successivement deux facteurs sur trois, à l'échelle globale comme à l'échelle locale. Il y a neuf combinaisons possibles, chaque combinaison fut répétée cinq

fois. En analysant les orientations issues des combinaisons identiques entre le choix global et le choix local, nous avons pu répondre à (1). En analysant les orientations des combinaisons distinctes d'une échelle à l'autre, nous avons pu répondre à (2).

Un second temps d'étude a permis d'avancer sur (3). Nous avons effectué 115 simulations sur une journée type de milieu de saison sèche, à partir de 115 combinaisons où les trois facteurs non liés à la végétation étaient fixés aléatoirement entre 0 et 1, identiquement pour les choix global et local. C'est-à-dire que dans le cas où ($|P_1| = 1 ; |P_2| = 0,15 ; |P_3| = 0,15$) globalement, alors ($|P_1| = 1 ; |P_2| = 0,15 ; |P_3| = 0,15$) localement, avec P_i la pondération du facteur i . Il n'y a donc pas eu de répétitions de ces combinaisons. Les critères de validations sont des variables observées des circuits journaliers des troupeaux. Chaque critère est nécessaire pour que la simulation soit réaliste, donc valide. Une variable simulée est valide si elle est dans l'intervalle de valeurs du critère correspondant observé. Une simulation est valide si l'ensemble de ses variables simulées sont valides.

Ces travaux ont déjà été présentés et discutés dans l'article ci-avant. Toutefois, il est utile de s'attarder sur les principaux résultats de cette étape, qui justifient le passage à l'implémentation d'une deuxième étape de modélisation. (1) L'un des résultats majeurs de cette étape concerne le facteur abiotique d'attraction aux aménagements. Il est très structurant pour les circuits simulés. Il est garant du passage aux aménagements et est donc nécessaire pour le réalisme du modèle. En revanche, seul dans la règle de décision, il polarise trop vite les agents sur le prochain aménagement à atteindre et invalide les circuits, trop courts en temps et en distance. C'est d'autant plus vrai que l'éloignement entre parc de nuit et point d'eau est faible. (2) Un deuxième résultat majeur est que les choix exprimés globalement et localement ne sont pas nécessairement cohérents. Considérons le cas où le facteur d'attraction aux aménagements est le seul non-nul dans la règle de décision globale, alors que le facteur de moindre distance à parcourir est le seul non-nul dans la règle de décision locale. L'agent va alors sélectionner au premier pas de temps l'unité de végétation portant le point d'eau. Mais il ne l'atteindra pas puisque localement, il va sélectionner en boucle sa cellule courante, qui porte le parc de nuit à $t = 1$. Le corollaire de ce résultat est que la règle de choix local est la composante principale du déplacement. Cela ne rend toutefois pas la règle de choix global caduque : les deux échelles de décision sont couplées par le facteur de marche en avant. En effet, à l'échelle globale, le facteur de marche en avant favorise les unités de végétation en avant de la direction liant l'avant dernière unité de végétation choisie avec la dernière unité de végétation choisie (et atteinte). A l'échelle locale, ce facteur favorise les cellules dans l'axe entre la position courante de l'agent et l'unité de végétation choisie (à atteindre).

Pour appuyer l'analyse de l'articulation des choix globaux et locaux, nous avons alors ajouté une variable de validation : elle enregistre la concordance des unités choisies et effectivement rejointes. Il y a eu six critères de validation des simulations. Nous avons remarqué qu'il y a toujours une bonne cohérence des décisions locales et globales lorsque la pondération des facteurs de choix est identique globalement et localement. Nous avons adopté ce résultat pour les 115 simulations où les pondérations des trois facteurs non liés à la végétation ont été tirées pseudo aléatoirement entre 0 et 1. Cette expérimentation a confirmée le rôle prépondérant que doit avoir le facteur d'attraction aux aménagements (pondération à 1 en valeur absolue). Cette « force » doit cependant être modérée par les autres facteurs, différemment selon les agents, vu l'éloignement respectif entre parc de nuit et point d'eau. Les combinaisons valides avaient les pondérations des deux autres facteurs à 0,25 en valeur absolue pour l'agent 1 (petit troupeau) mais à 0,15 pour l'agent 2 (grand troupeau). Nous avons donc pu valider des simulations, eu égard aux six critères d'analyse en plus de l'observation graphique des circuits simulés.

2.3. Perspectives d'amélioration et de complexification

Nous avons toutefois mis en évidence que les combinaisons valides n'étaient pas robustes pour tous les agents, en n'intégrant que des facteurs non liés à la végétation dans les règles de décisions. Nous avons établi les profils de temps de résidence observés par saison, par une ACP centrée à partir des temps de résidence analysés sur 116 circuits de suivis des troupeaux. La

méthode a été explicitée dans l'article ci-avant. Les profils des temps de résidence des circuits valides des agents 1 et 2 ont été projetés sur les axes de l'ACP, afin d'évaluer à quelle saison ils correspondaient. Toutefois, à ce stade, l'implémentation de la saisonnalité dans l'environnement des agents a été limitée à la position des aménagements. Nous n'avons donc pas été étonné que les circuits valides simulés montraient des profils intermédiaires entre les profils de temps de résidence évalués pour les troupeaux en début et en milieu de saison sèche, saisons où les positions des parcs de nuit et des points d'eau sont relativement similaires à celles que nous avons simulées.

Nous revenons une nouvelle fois sur la nécessité d'intégrer des facteurs liés à la ressource fourragère dans les règles de choix dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 :

Modélisation intégrée des comportements spatiaux et alimentaires de bovins en libre parcours pour raisonner la gestion durable d'un écosystème agropastoral tropical

Introduction : Représentation du comportement spatial et alimentaire dans le modèle PastoTrop

Le modèle multi-agents PastoTrop spatialise les choix alimentaires de bovins en libre pâture sur des territoires pastoraux et agropastoraux, en zones tropicales sèches. PastoTrop situe le modèle sur parcours (agro)pastoraux tropicaux, mais illustre aussi les facteurs de tropisme des bovins pour les aménagements du parcours et les aires de végétation.

Dans la première étape de modélisation (cf. chapitre 2), nous n'avons pas poussé plus en avant les analyses sur la dynamique des deux facteurs d'économie du déplacement (i.e. marche en avant et moindre distance à parcourir), l'un par rapport à l'autre, notamment. Nous avons développé une deuxième version du modèle, où sont intégrés de nouveaux facteurs caractéristiques de la ressource végétale. Les troupeaux réagissent à la végétation et la saison impacte sur le paysage agropastoral. De ce fait, nous avons préféré travailler sur la robustesse et la hiérarchie des facteurs une fois les caractéristiques de la végétation implémentées.

Un formalisme désormais classique de présentation des modèles est l'UML (Unified Modeling Language : Fowler and Scott 2001, Müller and Bommel 2007). L'intérêt des modèles conceptuels en UML est de proposer un schéma de fait synthétique de l'organisation des entités (modèles statiques) et des processus de décision des agents (modèles dynamiques). Nous présentons ici le diagramme de classes conceptuel de la deuxième étape de modélisation : la deuxième version du modèle PastoTrop.

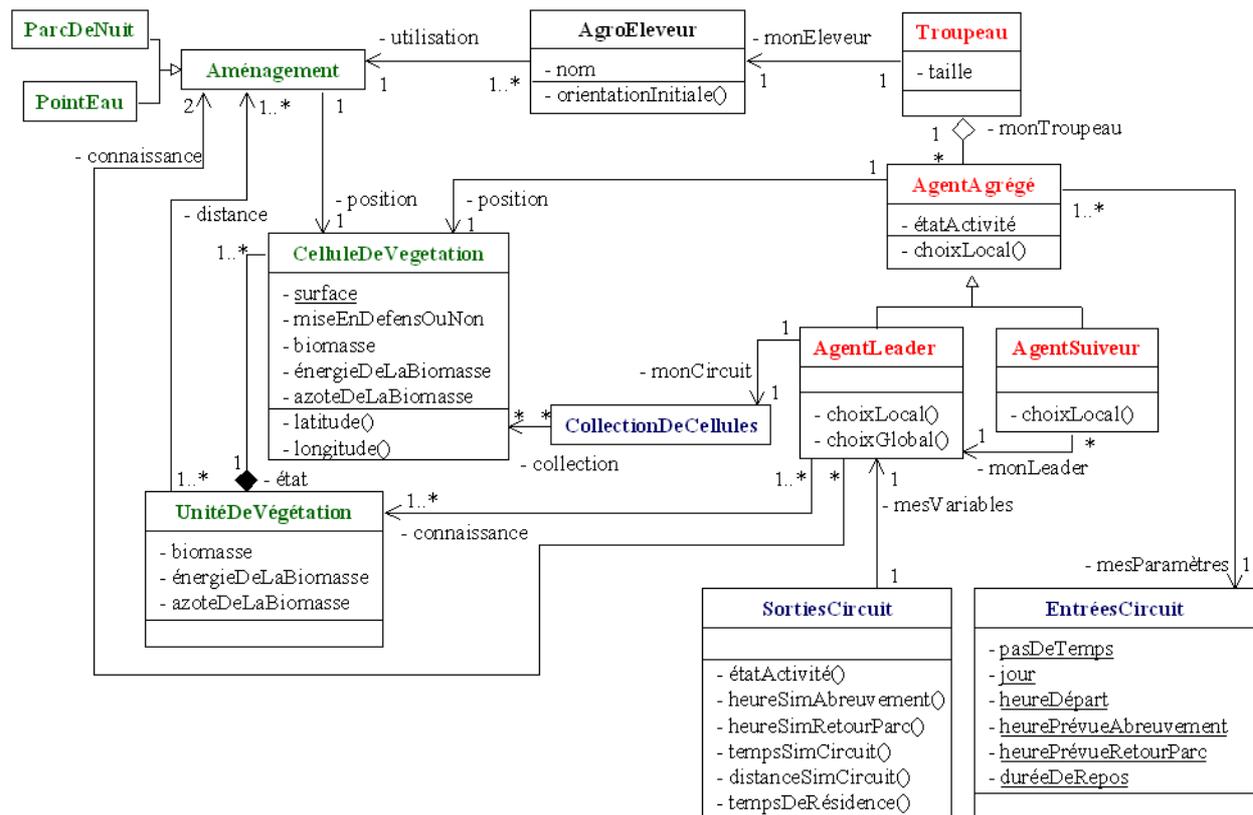


Figure 1. Diagramme de classes du modèle conceptuel du modèle PastoTrop, simulant le comportement spatial et alimentaire de bovins tropicaux sur parcours, en zones sèches. Les entités représentées sont encapsulées dans des classes, conformément à l'approche objet. Quatre « paquets » d'entités se distinguent : le parcours (en vert), les animaux (en rouge), l'agro-éleveur (en noir) et les structures utiles au calibrage et à l'analyse du modèle (en bleu). Le parcours est une construction de l'environnement des animaux, à partir d'entités de végétation et d'aménagements, abiotiques. L'agro-éleveur détermine quels aménagements sont utilisés et oriente son troupeau à l'heure de départ. Le troupeau, qui connaît son éleveur, est une agrégation d'individus, qui ne sont pas

nécessairement les bovins. L'individu peut, selon l'étape de travail, être différents niveaux de groupes de bovins (d'où le concept d'agent agrégé), depuis le troupeau en entier jusqu'au bovin. Ces agents peuvent être leaders ou suiveurs. Les suiveurs sont inféodés au leader. Tous les agents s'orientent de proche en proche, à l'échelle des cellules de végétation. Mais seuls les leaders expriment un niveau supérieur de choix, dit global, à l'échelle des unités de végétation. C'est pour cela que les leaders doivent connaître les entités UnitéDeVégétation. Ces entités sont des compositions de cellules de végétation de même « état » (par exemple, rizière ou végétation spontanée basse et dense, ou encore végétation spontanée haute et peu dense, etc.). C'est le circuit de chaque leader qui est analysable. Un circuit est construit comme une collection des cellules visitées par un leader donné, à chaque pas de temps. Ce circuit, ainsi que les variables de la classe SortiesCircuit émergent des choix, localement mais aussi globalement. Il y a une influence de la position des aménagements sur ces règles de choix, d'où les connections avec les cellules mais aussi avec les unités de végétation.

Ce modèle conceptuel est une représentation plus formelle que le modèle conceptuel que nous avons choisi de présenter dans l'article ci-après. Nous soulignons à présent que ce modèle conceptuel propose une architecture générique pour plusieurs étapes de travail d'implémentation du modèle PastoTrop. En effet, dans la version 1, les attributs de végétation n'ont pas été implémentés. Et le niveau d'agrégation des agents est fort : un agent est un troupeau. De ce fait, il n'y a pas de suiveurs : le troupeau est un agent leader. Dans la version 2, que nous explicitons dans l'article ci-après, les attributs de la végétation sont implémentés, mais le troupeau reste l'agent (qui est agent de décision).

Modélisation intégrée des comportements spatiaux et alimentaires de bovins en libre parcours pour raisonner la gestion durable d'un écosystème agropastoral tropical

Guillaume Chirat,¹ François Bousquet,² Alexandre Ickowicz,³ François Bocquier⁴

Les auteurs sont : ¹étudiant PhD en sciences animales, CIRAD & INRA, ERRC, Place P. Viala, 34060 Montpellier ; ²Directeur de recherches sur les systèmes multi-agents, CIRAD, TA C-18/F Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier ; ³Chercheur Senior en sciences animales, CIRAD, ERRC, Place P. Viala, 34060 Montpellier ; ⁴Professeur en sciences animales, Montpellier SupAgro, ERRC, Place P. Viala, 34060 Montpellier, France.

Résumé

Nous avons développé un modèle original, PastoTrop, de représentation du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours. Notre approche est troupeau-centrée où trois entités équivalentes, dénommées agents, ont été positionnées dans un environnement, issu du territoire observé, dénommé parcours. Le parcours est à la fois un stock de ressources végétales discrétisées et des aménagements (parc de nuit, point d'eau). L'objet de l'étude est de calibrer les règles de choix spatialisés des agents, intégrant des facteurs abiotiques et des caractéristiques des fourrages, dans un objectif de lier les performances animales aux circuits quotidiens. Les agents réagissent à deux échelles d'hétérogénéité de la ressource, localement au niveau patch de végétation et plus globalement sur les unités de végétation. Nous avons donc travaillé à représenter les choix spatialisés des agents sur le parcours (PastoTrop.v2.1) mais aussi à y associer un processus d'ingestion (PastoTrop.v2.2). Les deux temps d'étude du modèle PastoTrop.v2.1, (1) celui des liens entre facteurs d'entrées et variables de sorties ($n = 43\ 125$) et (2) celui de la stabilité des sorties de simulations répétées, ont abouti à deux conclusions majeures. (1) Les circuits quotidiens sont surtout déterminés par les choix locaux. Mais tous les facteurs d'entrée, à l'échelle locale comme globale, semblent nécessaires pour une bonne représentation de la réponse des agents au parcours. (2) Peu de combinaisons de facteurs assurent la stabilité des trajectoires des agents. Et aucune de ces dernières n'est très robuste entre les agents. Un réglage unique pour tous les agents semble possible mais la position initiale des agents interagit sur cette robustesse.

Parallèlement, trois méthodes d'ingestion ont été implémentées. Une première méthode dote les agents d'une vitesse d'ingestion régulière par pas de temps. Une deuxième méthode ajuste les vitesses d'ingestion instantanées aux biomasses disponibles selon les types de végétation, conformément à la théorie de la Réponse fonctionnelle. Cette méthode respecte un principe biologique de base mais est difficilement extrapolable depuis le pas de temps jusqu'à la durée du circuit. Une dernière méthode module la deuxième en divisant empiriquement les vitesses d'ingestion instantanées par trois.

Notre étude sur les réglages des choix spatialisés et les processus d'ingestion des agents nous permet d'aboutir à des simulations de bovins en libre pâture et de soutenir qu'il est nécessaire d'affiner la description de l'environnement et du comportement des agents, en les décomposant en individus. Ces complexifications dans une version évoluée du modèle devraient favoriser l'application d'un réglage stabilisé et robuste des choix spatialisés et d'envisager, à terme, de représenter les performances individuelles des agents.

Correspondence: Guillaume Chirat, ERRC : Elevage des Ruminants en Régions Chaudes, Campus Montpellier SupAgro, 34060 Montpellier, France. Email: chirat@supagro.inra.fr

Abstract

We developed an original model, called PastoTrop, featuring the spatial and feeding behavior of free grazing cattle herds on rangeland. Three equivalent entities, so called agents, from our herd-based approach, were located in an environment, built from the observed territory, so called rangeland. Rangeland is both a discretized forage resources stock and facilities (night park, watering point). The study object consists of calibrating agents' spatialized choices rules, to advance on one objective: to link animal performances with daily circuits. Such rules integrate abiotic factors and forages' characteristics. Agents react to two scales of resource's heterogeneity, locally and more widely. We thus worked to feature agents' spatialized choices on the rangeland (PastoTrop.v2.1) but also to develop an intake process (PastoTrop.v2.2). The PastoTrop.v2.1 version allowed to analyze at once (1) relationships between the input factors and the output variables ($n = 43\ 125$) and (2) the stability of repeated simulations' outputs. From this step ensue two main conclusions. (1) Daily circuits are determined at first by the local choices. However, all input factors, locally but also at the larger scale, seem to be of interest in modeling the way agents respond to rangeland. (2) A few factors' combinations stabilize the agents' trajectories. Moreover, from those combinations, no one is robust for all agents. A single combination seems to be possible but under the constraint of the agent's initial location.

At the same time, three intake methods were implemented. A first method gives a constant intake rate per time step to agents. A second method fits instantaneous intake rates with available biomasses, in accordance with the Functional response theory. This method thus has a basic biological principle but is hardly extrapolable from the time step to the circuit's duration. A last rules-of-thumb method modulates the second one, through dividing instantaneous intake rates by three.

Our study on the adjustments of agents' spatialized choices and intake processes allows us to maintain that it is necessary to describe more precisely the rangeland and agents' behavior (e.g. by decomposing them). These complexification in an advanced version would favorise the research of a stabilizing and robust factors' combination for all agents, and to foresee representing animal performances.

Mots-clés: Troupeaux bovins, libre pâture, parcours tropical, modélisation multi-agents, choix spatialisés, comportement alimentaire, calibrage

INTRODUCTION

L'élevage extensif sur parcours est un atout majeur pour l'économie et la sécurité alimentaire de nombreux pays. Plus particulièrement, les systèmes agropastoraux des zones sub-humides à semi-arides constituent une activité agricole structurante pour les populations rurales qui contribue à la fois au dynamisme des économies nationales et engendre une forte production en viande de bœuf (Sere et al. 1995, ISRA 2003, Rodriguez 2008). Toutefois, une récente analyse de la FAO souligne les limites des systèmes agropastoraux pour répondre à l'accroissement de la demande mondiale ainsi que leurs impacts environnementaux négatifs sur les sols et l'atmosphère (Steinfeld et al. 2006). L'évaluation de la durabilité et de la flexibilité des systèmes agropastoraux est donc nécessaire pour répondre aux exigences environnementales et démographiques. La réflexion autour de la productivité des ruminants et de leur impact sur l'environnement, malgré la diminution des terres de parcours, est donc un sujet d'importance. Cette problématique est particulièrement prégnante en Afrique sub-saharienne (Steinfeld et al. 2006). Des démarches de recherche analytique classique ont été entreprises sur ces ruminants. Ces études ont porté sur les durées de pâturage et les consommations alimentaires (zébus Azawack : Ayantunde et al. 2001), sur la digestibilité de sous-produits de culture sur des lignées de races pure ou croisée afin d'évaluer leur adaptabilité relative aux conditions agropastorales locales (taurins N'Dama : Akinbamijo et al. 2003), sur l'influence, couplée ou non, de la complémentation et du

déparasitage sur les performances individuelles (zébus Gobra : Ba Diao et al. 2006), sur les facteurs de variation de l'intervalle entre vêlage de races locales soudaniennes (Abdalla and Elsheikh 2008). Toutefois, ces connaissances acquises en milieux contrôlés ne sont pas directement transférables dans les systèmes complexes d'élevage. Or les productions animales sur parcours agropastoraux sont déterminées, voire limitées, par les ressources alimentaires (de Ridder and Breman 1991). Donc l'adéquation entre ressources fourragères et besoins du troupeau est essentielle à considérer.

L'exploitation de ces ressources, constituées de parcours et de résidus de cultures, en zone subsaharienne, n'est permise que par la mobilité des troupeaux qui est l'élément majeur de flexibilité de ces systèmes (Dedieu et al. 2008). Cette forte dépendance entre présence des troupeaux et ressources végétales distribuées sur un territoire constitue une des clefs de la productivité animale. Ceci suppose d'intégrer les connaissances acquises, ou à acquérir, dans des approches spatio-temporelles des interactions entre troupeaux, ressources et pratiques d'élevage. Certaines études ont d'ores et déjà été menées en conditions traditionnelles de parcours sans toutefois spatialiser leurs approches (Ezanno et al. 2002, Knopf et al. 2004). Il s'agit pour nous, de proposer une représentation de l'environnement des bovins (alimentaire, abiotique) avec lequel ils interagissent par leur comportement alimentaire et spatial. En effet, une démarche spatialisée permettrait de mieux prendre en compte l'influence des circuits des troupeaux sur les performances individuelles. De plus, cette approche est nécessaire pour évaluer simultanément les composantes de la durabilité de ces élevages agropastoraux sur parcours. Une approche systémique qui englobe les troupeaux, les parcours, les pratiques et les bilans de matières (Ickowicz and Mbaye 2001, Manlay et al. 2004a, Manlay et al. 2004b, Masse et al. 2004) permet d'une part d'appréhender la richesse des interactions entre les éléments du système agricole, sans toutefois expliquer les relations dynamiques entre ressources et performances. A travers la modélisation, nous avons recherché un compromis entre le réalisme de la représentation des interactions entre troupeaux et parcours et la nécessaire parcimonie de la programmation. Pour cela, nous avons privilégié l'approche zootechnique (nutrition, comportement alimentaire, valeurs alimentaires des couverts) implémentée par des techniques issues de l'Intelligence Artificielle, pour développer un outil innovant en recherche-action, au service de l'intensification écologique.

Notre objectif est de présenter une reconstitution du comportement alimentaire spatialisé de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours agropastoral tropical, par un modèle orienté agent, à partir de suivis de terrain réalisés en Casamance (sud du Sénégal). Ce modèle simule des troupeaux qui répondent aux ressources, et aux contraintes abiotiques, via des fonctions expliquant leurs déplacements. Eu égard à des observations de terrain (Chirat et al. submitted-a, submitted-b) et des théories du comportement, nous justifions des options retenues pour l'implémentation. L'évaluation des résultats de simulation doit permettre un calibrage des fonctions du modèle permettant à terme de simuler des stratégies d'intensification écologique.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Choix d'un formalisme adapté à la représentation des interactions entre troupeaux et parcours

1.1.1. Intérêt des systèmes multi-agents. Le système étudié, qui englobe les troupeaux et le parcours, doit pouvoir être représenté par un modèle. Il est caractérisé par un environnement relativement autonome de par ses composantes (végétation, aménagements, animaux) et par leurs flux (ingestion, restitutions). Il est également caractérisé par des interactions multiples entre, d'une part des animaux, qui se déplacent dans l'espace au cours du temps et d'autre part, les différentes parties du terroir qui évoluent sous l'action des animaux au cours du temps. Ce système est donc un objet en soi, pour lequel nous avons cherché une méthode qui en décrive l'organisation et le fonctionnement.

L'étude de ce système est d'abord descriptive mais elle passe également par sa représentation : un tel système n'est pas nécessairement un simple objet et sa connaissance n'est

pas un simple résultat. Il peut être le résultat d'un processus récursif, sa connaissance réside alors dans l'action de le reconstruire (Le Moigne 1977, Walliser 1977). Lorsque l'objet principal du modèle est un individu, et particulièrement en écologie, on parle de modèle individu-centré, qu'il y ait ou non de la variabilité au cours des itérations de changement d'état de cette entité. Les « i-state distribution models » intègrent une variabilité inter individus et sont de ce fait le pendant des modèles à entités agents des sciences sociales (Bousquet and Le Page 2004). Les modèles par Simulations Multi-Agents (SMA), qui sont issus de l'Intelligence Artificielle, ont cherché à représenter des comportements d'individus ou de groupes animaux. Dans la recherche d'analogie avec les organismes vivants, Watts (1998) présente l'approche Animat : c'est une classe d'animaux simulés dont la vie artificielle émerge d'attributs et de processus permettant l'expression d'un comportement adaptatif à l'environnement. Les animats ont une variété d'adaptations possibles à leur environnement, ceux ayant des caractères jugés avantageux étant sélectionnés. Cette approche est une heuristique puissante présentée comme étant au service de l'étude des mécanismes sous-jacents du comportement animal. Les règles simples qui sont implémentées, sont issues de l'interprétation de la réalité par un modélisateur, et aboutissent à des comportements complexes qui sont qualifiés du principe d'émergence (Ferber 1995). Ce principe est remarquablement illustré dans les modèles des « Boids » de Reynolds (1987). Les boids sont des entités homogènes dont le comportement émergent du groupe est un mouvement d'ensemble coordonné, tel celui d'un banc de poissons. Ce mouvement peut découler de trois règles de base : une fonction de répulsion, afin d'éviter les collisions entre agents, une fonction d'ajustement de la vitesse des agents avec leur plus proche voisin, et une fonction d'attraction entre les agents.

Notre objectif étant de représenter un système complexe à visée opérationnelle, nous avons retenu ces SMA, au sens large, en éludant les nuances entre agents sociaux, animats, ou boids. En effet, les SMA permettent (1) de générer autant d'entités agents que l'on souhaite, (2) de faire émerger des processus plus ou moins complexes à partir de règles simples et (3) de lier les individus à leur groupe. Dans notre cas, cela signifie qu'il est possible (1) de représenter plusieurs troupeaux aux caractéristiques propres simultanément, (2) de calibrer des règles déterministes parcimonieuses pour obtenir des circuits journaliers, (3) de décomposer les entités Troupeaux en composants Individus. Ce dernier point indique qu'il est possible de reprendre et de complexifier des hypothèses au cours des étapes successives de calibrage. Cela vaut pour le niveau d'agrégation des agents, selon le besoin de détails. Notre intérêt pour les SMA réside en outre dans l'étude de l'optimalité des entités représentées. En revanche, nous n'implémenterons pas de règles de survie et de reproduction (c'est une différence avec l'approche Animat).

1.1.2. Les spécificités de la zone d'étude agropastorale tropicale. L'approche spatialisée des processus, que nous avons retenue, permet de conserver la dimension biologique des interactions entre des ressources disponibles et leurs consommateurs mobiles (Durrett and Levin 1994). Nous avons suivi des bovins N'Dama (*Bos taurus*) sur le terroir villageois de Saré Yoro Bana (lat 12°49'N, long 14°53'W), dans la région de Kolda, au sud du Sénégal. Les troupeaux évoluent au cours de la journée à l'intérieur de différents groupements morphopédologiques, tels que la forêt, la savane ou les aires de cultures, et sont attachés la nuit. Au sein de ces groupements se dégagent des unités écologiques, ou formations, telles que, par exemple, la savane herbacée ou la savane arbustive pour un écosystème de savane, ou bien encore une parcelle de maïs pour l'aire cultivée. A l'intérieur d'une de ces unités de végétation, on peut encore distinguer différents couverts homogènes. Les bovins évoluent donc dans une hétérogénéité spatiale à différentes échelles, qu'ils contribuent à modifier par leurs fréquentations (Kolasa and Rollo 1991, Gross et al. 1995).

Rappelons que les suivis sur parcours ont été réalisés quotidiennement pour plusieurs troupeaux catégorisés en « grand » (au moins 60 femelles primipares ou multipares) ou « petit » (environ 20 femelles primipares ou multipares), sur plusieurs années. Une première série eut lieu avec le programme ABT en 1993-1996, complétée par nos suivis personnels en 2008-2009. L'année est divisée en quatre saisons (DSS, MSS, FSS et SP). Le début de saison sèche (DSS) s'étale de mi-octobre à fin décembre et correspond aux retours des troupeaux sur les champs

progressivement récoltés, mais nécessitant la présence d'un bouvier. A partir de janvier, les animaux sont totalement en vaine pâture ; c'est le milieu de saison sèche (MSS), jusqu'au début du mois de mars, lorsque les pailles de riz résiduelles de la rizière ont été presque entièrement consommées. La fin de saison sèche (FSS) est la période de l'année où les températures s'élèvent, jusque vers mi-juin, où les orages deviennent plus fréquents. Durant la saison des pluies (SP), les troupeaux sont à nouveau gardés et maintenus en forêt et donc tenus éloignés des parcelles. Ce découpage temporel, qui a été préalablement justifié (cf. chapitre 2, § 1.2.), a été nécessaire pour analyser la gestion et le comportement des troupeaux sur parcours. Notre approche de modélisation de la libre pâture concerne donc la fin de DSS, puis MSS et FSS.

1.1.3. Données d'observations du comportement spatial et alimentaire des troupeaux.

Pour répondre à l'objectif d'une modélisation réaliste d'un tel système complexe, nous avons dû collecter différentes informations sur le terrain. A l'échelle du troupeau, les facteurs de variabilité collectés durant nos suivis furent (1) le type de troupeau, comprenant la taille (« grand » ou « petit »), les localisations du parc de nuit (zone d'attache), du point d'eau fréquenté et plus globalement les pratiques de l'éleveur, ainsi que (2) la saison (DSS, MSS, FSS et SP). Par jour de suivi, nous disposions de données climatiques (températures minimales et maximales journalières) et d'ensoleillement (heures de lever et de coucher du soleil). Enfin, au cours de la libre pâture, nous avons déterminé en continu les unités de végétation et types de couverts traversés et consommés, l'activité moyenne du troupeau (i.e. pâturage-déplacement, déplacement seul, repos, rumination et abreuvement). Nous avons également enregistré les temps de parcours et les distances quotidiennes. Nous disposions également des vitesses de déplacement par activité. Nous résumons certains des résultats descriptifs des circuits dans le Tableau 1. Le choix des cinq variables présentées est justifié plus loin. Seules les données issues du MSS sont ici proposées. En effet, la représentation des choix spatialisés des troupeaux lors de la libre pâture repose sur l'expression de tous les processus que nous voulions représenter. Or la libre pâture débute pleinement avec le MSS. Nous nous focalisons donc sur cette saison, afin d'en représenter une journée type.

Tableau 1. Intervalle de valeurs des variables caractéristiques observées (mini. obs. et maxi obs.) mesurées sur le territoire villageois de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal), en milieu de saison sèche, pour des troupeaux de différentes tailles, classés en « petit » ($n = 11$) et « grand » ($n = 23$). Les variables sont distinguées par troupeau lorsque leurs valeurs sont significativement différentes au seuil de 0,05 (sauf pour l'activité de pâturage-déplacement : $P = 0,07$).

variable mesurée	mini obs.		maxi obs.	
	petit	grand	petit	grand
durée du parcours (h)	8,0		11,4	
durée entre départ et abreuvement (h)	2,5		5,0	
distance quotidienne (km)	3,0	3,6	5,6	9,2
activité pâturage-déplacement (%)	63	56	80	84
activité déplacement (%)	9	11	26	32

A l'échelle individuelle, nous avons estimé les quantités ingérées quotidiennes (QI, en kg de Matière Sèche /j) à partir de fèces par deux méthodes : soit en appliquant un coefficient de digestibilité, soit en les prédisant selon le spectre proche infra-rouge (SPIR) des échantillons de fèces collectés. La méthode SPIR est basée sur l'absorption sélective de l'infra-rouge [800 – 2500 nm] par les différents composants de la matière organique (Garnsworthy and Unal 2004, Fanchone et al. 2007, Decruyenaere et al. 2009). Cette technique est relativement simple, rapide et non-destructive mais nécessite un calibrage préalable de la méthode par des relations établies entre des valeurs SPIR de fèces (qui varient selon les paramètres estimés : teneur en matière sèche, en matière minérale, neutral detergent fiber, acid detergent fiber et acid detergent lignine)

et des estimations préalables de QI de bovins tropicaux (Lecomte et al. 2003). En outre, nous avons évalué les vitesses d'ingestion instantanées (VI, en g MS/min) sur les différents types de couverts consommés. Les résultats ont déjà été présentés et discutés dans le chapitre 1 et sont résumés dans le Tableau 2. Les VI ont été estimées par la méthode de la collecte du Berger (Guérin et al. 1986). Les modèles asymptotiques d'ajustement des VI en fonction des biomasses élaborés par type de couvert à partir de la zone d'étude, en accord avec le cadre théorique de Réponse fonctionnelle (Ungar 1996, van Langevelde et al. 2008), ont été formalisés par des modèles de type Michaëlis-Menten.

Tableau 2. Paramètres des modèles prédictifs des vitesses d'ingestion (g MS/min) à partir des biomasses disponibles, selon les types de couvert. Ces paramètres ont été estimés soit par l'ajustement des vitesses d'ingestion observées sur le territoire villageois de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal) par un modèle Michaëlis-Menten, lorsque cela était possible, soit à partir de la valeur médiane des vitesses d'ingestion observées (feuilles de buissons). VI max est la vitesse d'ingestion à l'asymptote. K est la valeur de biomasse lorsque la vitesse d'ingestion est égale à la moitié de VI max, l'erreur standard (e.s.) des paramètres estimés est également précisée. Les paramètres significatifs ($P < 0,05$) sont indiqués en gras.

Couverts	K	VI max
prairies sous palmeraie	771 (e.s.= ±723)	62 (e.s.= ±11)
feuilles de buissons	(9,5)	
canne	450 (e.s.= ±540)	44 (e.s.= ±11)
pailles diverses	922 (e.s.= ±387)	58 (e.s.= ±7)
pailles de riz	422 (e.s.= ±124)	52 (e.s.= ±3)
litière	293 (e.s.= ±302)	47 (e.s.= ±8)

Enfin, nous avons étudié les caractéristiques qualitatives et quantitatives des couverts consommés (Tab. 3) : biomasses disponibles (en kg MS/ha), indicateurs de qualité en énergie nette (en %, à partir d'une estimation de la digestibilité de la matière organique) et en azote (en %, à partir d'une estimation des matières azotées totales).

Tableau 3. Données caractéristiques de la ressource agropastorale du territoire villageois de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal), en milieu de saison sèche. Moyenne (moy.) et écart-type (e.t.) des biomasses (Bm) sont précisées. Les indices de qualité sont relatifs et correspondent aux teneurs en azote (N) et en énergie nette (E) disponibles dans les couverts pâturés.

Couverts	moy. Bm (kg MS/ha)	e.t. Bm (kg MS/ha)	indice N (%)	indice E (%)
prairies sous palmeraie	2226	±937	5	30
feuilles de buissons	280	±10	10	50
canne	1880	±765	2	23
pailles diverses	2602	±777	3	30
pailles de riz	2089	±799	3	33
litière	2001	±1041	5	42

Les biomasses ont été estimées par la récolte de la matière végétale aérienne dans une surface d'un demi mètre carré, extrapolée à la surface du couvert ($n = 649$, dont 223 en MSS). Quant aux qualités, elles ont été estimées par la technique des SPIR sur des échantillons (une dizaine par type de couvert). Même si les valeurs estimées pour des couverts mono-spécifiques sont en accord avec les tables établies (INRA 1989, Rivière 1991, Guerin 1999), nous n'avons pas pu valider ces résultats vu la faiblesse du nombre d'échantillons disponibles. Toutefois, nous n'avons pas cherché à étudier les qualités des couverts spécifiquement, mais à disposer de valeurs

relatives de qualité selon les couverts, ces dernières pouvant modifier les choix des bovins sur parcours.

1.1.4. Elaboration d'un modèle conceptuel du système complexe représenté. Nous présentons ci-après le modèle conceptuel que nous avons élaboré (Fig.1), où l'ensemble des relations entre entités a déjà été épuré. Toutefois nous avons conservé les échelles du troupeau et de l'individu pour bien souligner que la finalité de l'étude est de lier les performances individuelles aux circuits du troupeau.

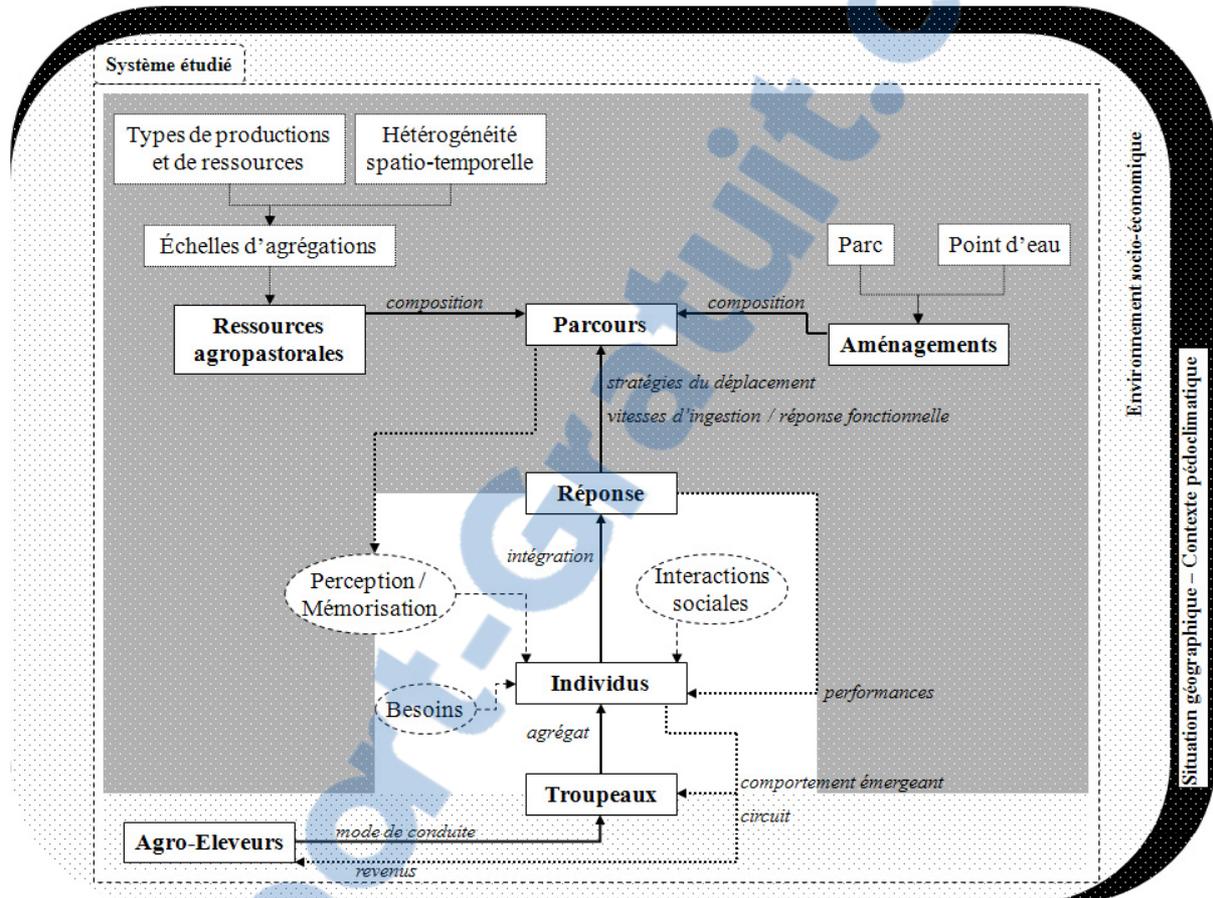


Figure 1. Modèle conceptuel du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur un territoire agropastoral tropical. Le système villageois agropastoral englobe plusieurs classes d'entités liées par des liens de dépendance, de composition ou d'interaction. Les flèches pleines, épaisses, et celles en pointillés représentent les processus de prime importance liant les pratiques de l'éleveur, le troupeau, et les individus au parcours. L'agro-éleveur influence son troupeau par ces pratiques. Les individus composent le troupeau comme un agrégat complexe. Si la classe Individu porte principalement les attributs qui caractérisent les ruminants, la classe Réponse englobe les fonctions qui permettent à l'Individu de formuler un choix spatialisé ou d'estimer une quantité de matière à ingérer. Cette réponse est en grande partie liée aux informations issues du parcours. Le parcours est composé de ressources agropastorales et d'aménagements. Parallèlement, les choix des individus ont, par propriétés, un effet sur leurs performances, qui contribuent au comportement apparent du troupeau, et qui influent sur l'économie de l'agro-éleveur.

Chaque entité constitue une classe, qui englobe les attributs et les opérations propres à l'entité (non représentés dans ce modèle conceptuel). Dans l'enchaînement, les animaux sont au centre du système. Les troupeaux ont un mode de conduite (attache la nuit, libre pâture sur parcours, etc.). Les ruminants, par leurs caractéristiques de perception, d'interactions sociales et par leurs besoins physiologiques, répondent à plusieurs niveaux d'agrégation de l'environnement. Ainsi, selon l'échelle perçue, les individus s'orientent et consomment de la ressource végétale. Les ressources agropastorales sont définies à différents niveaux d'agrégation : faciès

morphopédologique, parcelles ou unité de végétation, patches. Ces agrégations varient en fonction de l'hétérogénéité mais aussi du type de la ressource (cultivée, spontanée). L'environnement (Parcours) est complexe. Il est à la fois composé de ces ressources agropastorales et également d'aménagements. Les aménagements sont, dans notre cas, les points d'eau et les parcs de nuit.

Il nous a semblé important de faire apparaître la classe Réponse comme une entité propre dans ce modèle conceptuel. En effet, si la représentation des autres classes d'entités peut être très descriptive, la classe Réponse demande au modélisateur de créer les fonctions qui vont générer les processus à étudier. En l'occurrence, il s'est agi ici d'implémenter des fonctions permettant aux ruminants d'avoir des activités alimentaires sur parcours tout en réagissant potentiellement à différentes échelles d'hétérogénéité de la ressource, à leurs besoins physiologiques et aux contraintes sociales entre individus, intra-troupeau.

1.2. Phase exploratoire sur la mobilité des troupeaux

1.2.1. Intégration d'éléments théoriques et mesurés. La construction d'un modèle original spatialisé représentant des agents bovins sur un parcours composé de ressources agropastorales et d'aménagements (Fig. 1) nécessite de faire des choix parcimonieux et de procéder par étapes successives dans le développement informatique. La parcimonie est un principe de base permettant au modélisateur de rester maître des processus en l'obligeant à implémenter plusieurs versions de plus en plus complexes de son modèle (méthode « *keep it simple, stupid* » : KISS, cf. Hoch 2004). Après la première étape de discussion du modèle conceptuel qui décrit un système étendu, nous avons restreint le système en caractérisant l'environnement et en définissant les agents. Le territoire exploité par les bovins fait 20 km² environ. Ce territoire a été discrétisé en cellules de végétation de 20 x 20 m. Ces cellules ont été agrégées en unités de végétation, de superficie proche d'un ha : parcelle cultivée, parcelle de jachère jeune, savane herbacée, forêt claire, par exemple. La surface des cellules unitaires de végétation a été choisie empiriquement de manière à être un bon compromis entre une échelle suffisamment fine pour un troupeau et également valable pour un seul animal. Finalement cette surface unitaire a correspondu de façon satisfaisante avec la contrainte d'homogénéité d'un couvert pâturé par plusieurs animaux, stables dans cette activité. Nous pouvons donc assimiler ces cellules unitaires à un patch de végétation tel que défini par Bailey (1996).

Concernant l'agent Troupeau nous avons retenu, que son orientation sur le territoire répond à plusieurs niveaux d'intégration des informations sur son environnement, comme cela a été mis en évidence (Bailey et al. 1996, Agreil et al. 2006). Les déplacements dans cet environnement reposent sur la mémorisation à grande échelle de sites de ressources d'intérêt d'une part, sur la perception locale de ressources d'intérêt d'autre part, voire même sur des motivations non liés à la perception de la ressource alimentaire (Pyke 1984, Mueller and Fagan 2008). Choisir un agent Troupeau nous permet de nous affranchir des contraintes sociales de dominance – subordination, qui influent sur la répartition des individus à l'intérieur des patches (Dumont and Boissy 1999). De plus, nous n'abordons pas directement les questions posées par le leadership spatial (Ramseyer et al. 2009) : combien d'individus sont impliqués dans la prise de décision du départ d'un patch ? Sont-ce toujours les mêmes animaux ? Quelle est la contribution inter individuelle à la sinuosité des trajectoires selon les différents statuts (leader ou suiveur) à l'intérieur d'un patch ? Cependant, la définition d'un agent au niveau d'agrégation du troupeau ne permet qu'une simplification limitée du pas de temps nécessaire des simulations, i.e. l'approche du temps reste fine. Empiriquement, nous avons estimé que des changements d'orientation opérés à partir de l'arrivée sur un couvert nouveau sont de l'ordre de 5 min. Le pas de temps a donc été fixé à 5 min, à l'intérieur d'une journée. Les itérations successives de ce modèle doivent nous permettre de simuler, outre l'échelle quotidienne, toute la période de vaine pâture jusqu'à la fin de la saison sèche.

Une fois l'environnement et le statut des agents définis, il s'est agi d'obtenir des circuits journaliers des troupeaux réalistes. Une hypothèse forte de notre modèle a été que nous serions capables de faire émerger des circuits réalistes en privilégiant l'effet d'attraction exercé par les aménagements, en le modulant par des règles "d'économie" des déplacements, tout en minimisant

la réaction des agents face aux ressources végétales. Ces règles sont cohérentes avec certaines hypothèses d'optimalité des déplacements, retenues par Pyke (1984), même si elles ont été définies pour un individu isolé. Cette hypothèse a permis une simplification dans une première étape de modélisation, puisque les attributs de la végétation et la nature de la réponse des bovins à ces attributs sont difficiles à intégrer aux premiers stades de conception. Nous avons donc d'abord implémenté les trois facteurs de choix non liés à la végétation qui sont présentés dans les trois premières lignes du Tableau 4, selon nos observations de terrain et la bibliographie.

Tableau 4. Facteurs de choix des zones de végétation du parcours des agents Troupeaux. Les trois premiers facteurs ne sont pas liés aux caractéristiques de la végétation, contrairement aux trois suivants. Chaque facteur confère une valeur normée, entre 0 et 1, à une zone de végétation donnée. Les aménagements sont le point d'eau et le parc de nuit.

nature du facteur	dénomination	description	justification
économie des déplacements	marche en avant	meilleures valeurs aux zones de végétation comprises dans un cône de + ou - 45° par rapport à la direction précédente de l'agent	le déplacement des troupeaux est compris dans un cône de + ou - 45° durant 78% du temps de parcours (n=436)
économie des déplacements	moindre distance à parcourir	meilleures valeurs aux zones de végétation directement autour de la position actuelle du troupeau	l'optimalité d'un déplacement passe par le gain net de la zone choisie par rapport au coût du déplacement (Pyke, 1984)
facteur abiotique	attraction du prochain aménagement à atteindre	facteur temps-dépendant qui confère une valeur de plus en plus forte à la zone de végétation portant le prochain aménagement à atteindre, polarisant progressivement les agents vers l'aménagement pour le rejoindre autour de l'heure de passage prévu, calibrée	l'importance des facteurs abiotiques dans les choix des ruminants n'est plus à démontrer, en particulier pour l'attraction du point d'eau (Bailey et al., 1996 ; Ganskopp, 2001), outre le retour quotidien au parc de nuit
facteur biotique	biomasse disponible	meilleures valeurs aux zones de végétation à forte biomasse	la rationalisation du succès reproducteur passe par la recherche d'une maximisation du bénéfice à rejoindre une zone : cela passe par la quantité de matière disponible
facteur biotique	indice d'azote disponible	meilleures valeurs aux zones de végétation à forte teneur en azote	la rationalisation du succès reproducteur passe par la recherche d'une maximisation du bénéfice à rejoindre une zone : cela passe par la qualité de la matière disponible
facteur biotique	indice d'énergie nette disponible	meilleures valeurs aux zones de végétation à forte teneur en énergie nette	c'est un autre facteur de qualité de la matière disponible

Les agents réagissent donc à deux échelles du territoire, celle globale (G) de l'unité de végétation, et celle locale (L) de la cellule de végétation. Par parcimonie, les mêmes facteurs déterminent les scores des zones de végétations, globales et locales. Un agent est considéré comme omniscient : il connaît tout son environnement. Vu la dimension relativement faible du territoire et vu la répétitivité des circuits des troupeaux à une saison donnée, nous considérons que c'est une manière simplifiée mais raisonnable d'intégrer des capacités mémorielles aux agents, en les dotant d'une carte réaliste du territoire. Chaque agent va donc pouvoir choisir globalement parmi toutes les unités de végétation de l'environnement (Fig. 2). En revanche, son choix local est limité à un rayon qui est en rapport avec ses capacités de déplacement. Comme la vitesse moyenne d'un groupe suivi sur le parcours, en déplacement sans prise alimentaire, est d'environ 3 km/h, nous l'avons convertie en nombre de cellules de végétation atteignables au cours d'un pas de temps de 5 min.

Le modèle s'appelle PastoTrop, pour son application sur territoire (agro)pastoral tropical, mais aussi de par ses facteurs de tropisme des troupeaux vers des aires choisies du parcours. Une première version du modèle, PastoTrop.v1, contenant les éléments décrits ci-dessus (seuls les trois facteurs non liés à la ressource agissent), a donc été implémentée, sous la plate-forme de modélisation et de simulation multi-agents Cormas (Bousquet et al. 1998).

1.2.2. Paramétrage des règles de choix des agents, intégrant des facteurs non liés à la ressource. Dans une version initiale du modèle nous cherchons d'abord à mimer les circuits observés en Milieu de Saison Sèche (MSS). Cette étape a été publiée dans Chirat et al. (submitted-b). La fonction mise en jeu doit rendre compte de la répétitivité des circuits à l'échelle de la journée. Les conditions initiales sont un départ pour tous les agents à 9h30, un passage attendu au point d'eau vers 13h00, et un retour au parc de nuit après 9h environ de parcours, soit autour de 18h40. L'attraction aux aménagements successifs est permise grâce à une sous-fonction du facteur abiotique d'attraction aux aménagements (Tab. 4). Elle a été formalisée telle que développée par Cambier et al. (2005) :

$$\text{Sous-fonction temps-dépendante} = \frac{\exp. (a \times [t - h. \text{départ}] / [h. \text{aménagement} - h. \text{départ}])}{\exp. (a)} \quad [1]$$

avec 'a' un paramètre multiplicatif fixé empiriquement à 3, t l'instant considéré (en h), 'h. départ' l'heure de départ, et 'h. aménagement' l'heure initialisée de passage attendu au point d'eau, avant abreuvement, et l'heure initialisée de retour attendu au parc de nuit, après abreuvement, respectivement. La valeur du paramètre 'a' permet, empiriquement, de calibrer le modèle en fonction des résultats attendus.

La fonction de décision, à un pas de temps donné s'appuie sur le score des zones de végétation environnantes [2] qui est le résultat d'une combinaison linéaire des trois facteurs de choix non liés à la ressource fourragère (Tab. 4), globalement comme localement :

$$\text{Score (zone de végétation)} = \alpha \times (\text{marche en avant}) + \beta \times (\text{moindre distance à parcourir}) + \gamma \times (\text{attraction du prochain aménagement [1]}) \quad [2]$$

Chaque unité de végétation, globalement, et chaque cellule de végétation, localement, à un instant de choix, est caractérisé par un score, résultat de [2]. La fonction de choix détermine ces scores et l'agent choisit alors la valeur numérique la plus haute. Les critères de validation des simulations sont des variables issues des circuits journaliers des troupeaux, résumées dans le Tableau 1. Chaque critère est nécessaire pour que la simulation soit réaliste, donc valide. Une variable simulée est valide si elle est contenue dans l'intervalle de valeurs du critère correspondant observé. Réciproquement, une simulation n'est valide que si l'ensemble de ses variables simulées est valide.

Seules les activités de pâturage-déplacement et de déplacement simple ont été retenues comme variables de validation (Tab. 1). En effet, ces activités, au cours des simulations, émergent des choix effectués par chaque agent, contrairement au repos qui, lui, a été calibré et donc fixé. Nous connaissons les vitesses moyennes des troupeaux en pâturage-déplacement et en déplacement. Ainsi, si une cellule de végétation est choisie localement dans un rayon supérieur à celui atteignable à la vitesse de pâturage-déplacement pendant un pas de temps, alors l'activité enregistrée au cours de ce pas de temps est Déplacement. Sinon, l'activité est : Pâturage-déplacement. L'activité Repos est calibrée, de 2 à 20% du temps de parcours. Il n'y a pas d'effet troupeau ($P > 0,10$), i.e. le calibrage vaut pour tous les agents. L'activité d'abreuvement donne une inertie très limitée aux troupeaux au cours de la journée. Ils ne s'arrêtent que cinq minutes environ au point d'eau. En conséquence, nous avons agrégé cette activité au repos. Quant à l'activité ruminatoire, elle n'est quasiment jamais observée pendant la phase de libre pâture.

Les résultats obtenus à partir de PastoTrop.v1 n'apparaissent pas dans la partie Résultats car cette première étape a été valorisée dans Chirat et al. (submitted-b). Toutefois, afin de

maintenir la cohérence de nos choix de modélisation jusqu'à la deuxième version du modèle, PastoTrop.v2, trois résultats majeurs de la première étape de travail sont rappelés. (1) Le facteur abiotique d'attraction aux aménagements est apparu très structurant pour les circuits simulés. Il est garant du passage aux aménagements et est donc nécessaire pour le réalisme du modèle. En revanche, seul dans la règle de décision, il polarise trop rapidement les agents sur le prochain aménagement à atteindre et invalide les circuits, trop courts en temps comme en distance. Ceci est particulièrement vrai lorsque l'éloignement entre parc de nuit et point d'eau est faible.

(2) Les choix exprimés globalement et localement ne sont pas nécessairement cohérents. Dans le cas où le facteur d'attraction aux aménagements est le seul non-nul dans la règle de décision globale, alors que le facteur de moindre distance à parcourir est le seul non-nul dans la règle de décision locale, l'agent va sélectionner au premier pas de temps l'unité de végétation portant le point d'eau mais ne l'atteindra pas puisque localement, il va sélectionner en boucle sa cellule courante, qui porte le parc de nuit à $t = 1$. En effet, initialement, un agent est sur la cellule qui porte son parc de nuit également. Or le facteur de moindre distance confère le meilleur score à la cellule courante, puis aux huit cellules contiguës, et ainsi de suite. Le corollaire de ce résultat est que la règle de choix local est la composante principale du déplacement. Cela ne rend toutefois pas la règle de choix global caduque : les deux échelles de décision sont couplées par le facteur de marche en avant. En effet, à l'échelle globale, le facteur de marche en avant favorise les unités de végétation en avant de la direction liant l'avant dernière unité de végétation choisie avec la dernière unité de végétation choisie (et atteinte). A l'échelle locale, ce facteur favorise les cellules situées dans l'axe entre la position courante de l'agent et l'unité de végétation choisie (à atteindre). Pour appuyer l'analyse de l'articulation des choix globaux et locaux, nous avons alors ajouté une variable de validation : elle enregistre la concordance entre des unités choisies et effectivement rejointes. Avec les variables présentées dans le Tableau 1, il y a donc six critères de validation des simulations. Nous avons observé qu'il y a toujours une bonne cohérence des décisions locales et globales lorsque la pondération des facteurs de choix est identique globalement et localement (100 % des combinaisons testées).

(3) L'analyse spatiale des circuits simulés à partir des facteurs de choix non liés aux ressources végétales, explicitée dans le chapitre 2 (cf. chapitre 2, § 2.5.), indique des caractéristiques intermédiaires entre les circuits observés en DSS et MSS. La cause est l'implémentation de la saisonnalité dans l'environnement des agents qui est limitée, à cette étape, à la position des aménagements. En effet, entre DSS et MSS, les aménagements sont identiquement positionnés, en particulier le point d'eau qui est la nappe affleurante dans la rizière. Dans la deuxième étape que nous présentons ci-dessous sont développés de nouveaux facteurs caractérisant la ressource végétale. Les troupeaux réagissent à la végétation et la saison impacte le territoire agropastoral (en terme de biomasses notamment). De ce fait, nous nous sommes attachés à améliorer la robustesse et la hiérarchie des facteurs une fois les caractéristiques de la végétation implémentées (Tab. 4).

1.3. Intégration de facteurs liés à la ressource dans les règles de choix des agents, et des processus d'ingestion

1.3.1. Description de la deuxième version de PastoTrop. Dans cette version complexifiée, appelée PastoTrop.v2.1, l'environnement des agents, i.e. leurs positions initiales et le découpage en unités de végétation restent les mêmes qu'à l'étape précédente (Fig. 2).

A l'initialisation, le premier agent (agent 1) est positionné sur son parc de nuit dans la zone cultivée du glacis, très proche du point d'eau situé sur la rizière à cette période (distance : 359 m). L'agent 1, par la localisation de son parc de nuit, représente un petit troupeau, tel qu'il fut défini dans la présentation de la zone d'étude. Le deuxième agent (agent 2) part d'un parc de nuit également sur le glacis cultivé, mais relativement éloigné du point d'eau (distance : 1,7 km). Cet agent représente un grand troupeau. Une troisième itération d'agent (agent 3) part d'un parc de nuit sur le glacis forestier, très loin du point d'eau (distance : 2,3 km). C'est une situation hypothétique qui n'existe pas sur la zone d'étude. Mais comparé à l'agent 1, l'agent 3 a un parc de nuit à une distance extrême du point d'eau, ce qui permet notamment de tester le comportement

du facteur abiotique d'attraction des agents au prochain aménagement à atteindre. Les agents sont bien similaires dans le modèle : c'est la position initiale sur le parc de nuit qui les distingue.

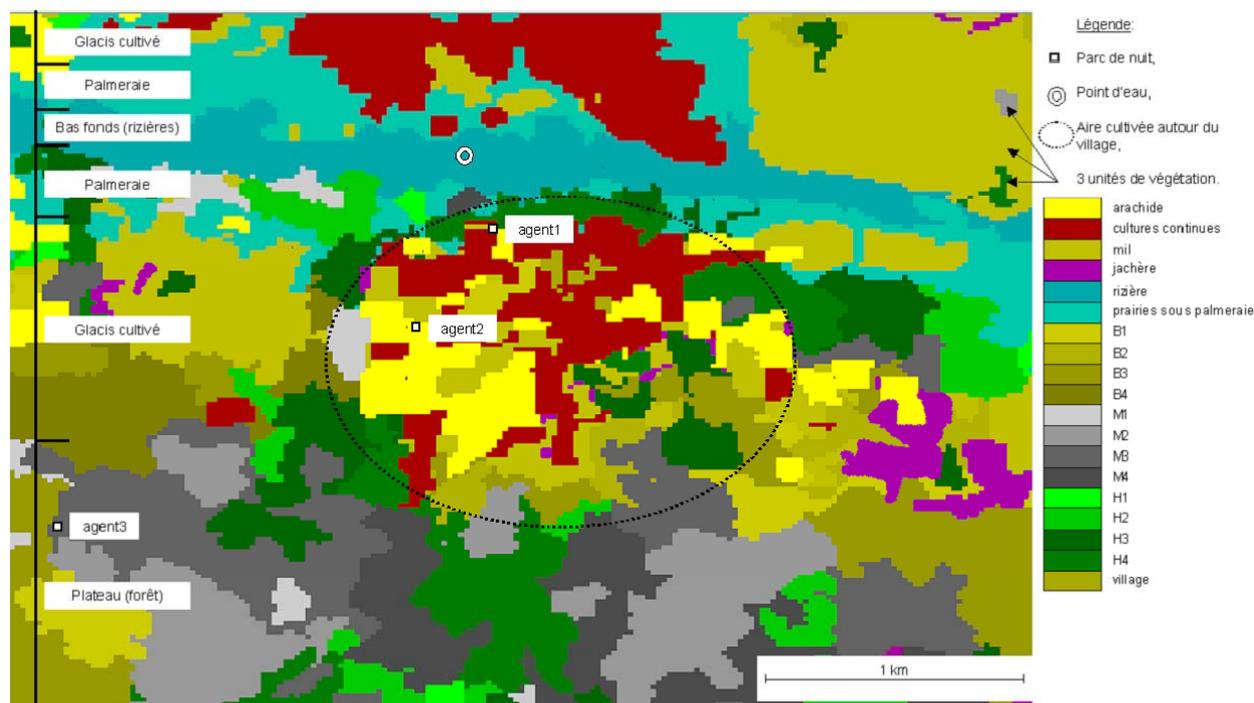


Figure 2. Carte pixélisée du territoire villageois agropastoral de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal). Les unités de végétation, agrégats de cellules unitaires carrées, forment l'environnement de trois agents Troupeaux, en plus des aménagements (parc de nuit et point d'eau). Les 315 unités de végétation sont une échelle d'hétérogénéité à l'intérieur de faciès morphopédologiques du territoire : plateau forestier, glacis en partie cultivé et bas fonds à rizières, bordés par la palmeraie.

La journée type simulée correspond encore à des conditions de MSS. C'est pourquoi, en plus de la variable de cohérence des unités choisies et rejointes, les cinq autres variables restent définies telles que présentées dans le Tableau 1. Un facteur de quantité et deux facteurs de qualité de la ressource végétale ont été intégrés. La théorie de l'Alimentation Optimale prévoit en effet que les ruminants réagissent relativement à ces attributs du parcours. Comme nous l'avons déjà abordé en début du Matériels et Méthodes, nous avons mesuré les biomasses disponibles sur les couverts consommés. Les facteurs de qualité retenus sont la quantité d'azote par kg MS (matières azotées totales) et la digestibilité de la matière organique, i.e. un indicateur d'énergie nette par kg MS. Biomasses et qualités ont été déterminées par types de couvert, mono- ou pluri-spécifiques : paille de riz, pailles de graminées, litière mêlant fruits ou feuilles sénescents et pailles, graminées épiées (cf. Annexe 3). La définition précédente de la ressource dans l'environnement des agents, en unités de végétation illustrées Figure 2, n'était donc plus assez précise. Les couverts consommés sur parcours ont alors été listés et situés, en fonction de la saison. Nous avons estimé qu'une unité de végétation a toujours un couvert majoritaire, occupant au moins les deux tiers de la surface. Le Tableau 5 présente la composition de la végétation.

Chaque couvert est caractérisé par une biomasse et deux indices de qualité (Tab. 3), déterminés à partir du terrain d'étude, en MSS. La dénomination « litière » est une catégorie agrégée de ressources, englobant des fourrages grossiers et des éléments fins. Qualitativement, nous avons considéré que chacun de ces deux types d'aliments constitue pour moitié la litière. C'est un choix nécessaire pour l'analyse des régimes simulés, proposés plus loin. En ce qui concerne les biomasses, la variabilité par type de couvert a été représentée : chaque occurrence d'un couvert situé sur une unité de végétation donnée a été dotée d'une biomasse distribuée aléatoirement autour de la moyenne observée, suivant une loi normale. Cette opération a été fixée au départ.

Tableau 5. Composition des unités de végétation (UV) en milieu de saison sèche, définies dans le modèle PastoTrop, occupées, respectivement, aux deux tiers et aux sixièmes, par les types de couverts consommés par les troupeaux en libre pâture.

Désignation de l'UV	Couvert 2/3	Couvert 1/6	Couvert 1/6
arachide	litière	litière	pailles diverses
cultures continues	litière	pailles diverses	canne
mil	litière	pailles diverses	canne
jachère	pailles diverses	pailles diverses	litière
rizière	pailles de riz	pailles de riz	pailles de riz
prairies sous palmeraie	graminées vertes	graminées vertes	feuilles de buissons
B1	pailles diverses	pailles diverses	litière
B2	pailles diverses	pailles diverses	litière
B3	pailles diverses	pailles diverses	litière
B4	pailles diverses	pailles diverses	litière
M1	pailles diverses	pailles diverses	litière
M2	pailles diverses	pailles diverses	litière
M3	pailles diverses	pailles diverses	litière
M4	pailles diverses	pailles diverses	litière
H1	pailles diverses	pailles diverses	litière
H2	pailles diverses	pailles diverses	litière
H3	pailles diverses	pailles diverses	litière
H4	pailles diverses	pailles diverses	litière
village	pailles diverses	pailles diverses	litière

L'objet de cette expérimentation informatique n'est pas à proprement parler une analyse de sensibilité du modèle, mais bien une recherche de calibrage des fonctions d'entrée. Il s'agit de proposer au moins une combinaison valide. L'objet de cette deuxième phase d'implémentation est d'une part (1) d'estimer quelle est la valeur ajoutée de l'intégration de ces facteurs liés à la végétation dans les règles de choix des agents. D'autre part, (2) vu la recherche de réalisme de la représentation, avec un minimum de paramètres entrés, nous souhaitons évaluer la possibilité d'obtenir une combinaison robuste de pondérations des facteurs. Nous cherchons donc un compromis applicable à tous les agents. Pour cela, nous utilisons deux méthodes de statistiques analytique et descriptive, décrites plus loin, pour avancer sur (1) et (2), respectivement.

1.3.2. Méthode d'analyse des simulations. Comme nous l'avons déjà précisé, il y a six facteurs dans chaque règle de décision, globale et locale. Faire varier les pondérations entre 0 et 1 (en valeur absolue) revient à d'innombrables simulations. Nous nous sommes donc appuyés sur quatre postulats. Le premier résulte des conclusions de la première version du modèle. Nous avons conclu qu'il était nécessaire que le facteur abiotique temps-dépendant d'attraction aux aménagements ait une pondération relativement importante, alors que les pondérations des autres facteurs devaient être plus faibles au risque de contre-balancer son effet. C'est pourquoi les pondérations du facteur abiotique temps-dépendant ont été bornées entre 0,5 et 1 (en valeur absolue) et les autres pondérations ont été restreintes à la plage [0 ; 0,75] (en valeur absolue). Vu que 100 simulations prenaient environ 7h par ordinateur, nous avons choisis de discrétiser les intervalles par une maille relativement large. Le deuxième postulat est donc qu'une variation de 0,25 pour chaque pondération permet de représenter suffisamment les cas possibles. Pour la règle de décision globale, toutes les combinaisons possibles s'élèvent encore à 3 072 possibilités. De même pour la règle locale. Le troisième postulat fait encore appel aux résultats de la première version du modèle : une combinaison identique appliquée aux règles globale et locale assure *a priori* une bonne cohérence des choix globaux et locaux. Le troisième postulat pose qu'il n'est pas utile de faire toutes les simulations possibles (3 072 x 3 072). Ainsi, les 3072 cas où les combinaisons de pondérations sont identiques pour les règles globale et locale ont été effectués. Les variations, où règles globale et locale diffèrent, ont été réalisées d'une manière pseudo-

aléatoire. 43 125 simulations ont finalement été conduites. Le dernier postulat pose qu'une seule répétition d'une combinaison donnée permet d'avoir une idée claire sur son intérêt. La règle de choix est très déterministe. Seule la possibilité de choisir identiquement dans un cône de $\pm 45^\circ$, fixée par le facteur de marche en avant, introduit de l'aléa. Nous avons estimé, vu le nombre de simulations prévues, que le déterminisme était suffisant pour ne pas répéter une même combinaison. Ce postulat est apparu comme un compromis entre les temps de simulation et l'objet de la démarche : obtenir au moins une combinaison robuste validant les simulations des différents agents.

Comme déjà évoqué, la validité des simulations est estimée de la même manière que celles conduites lors de la première étape. Il est à préciser que les variables de validation de l'agent 2 ont été utilisées pour l'agent 3, en modifiant toutefois le critère des distances parcourues, comme explicité plus loin. Pour chaque agent, chaque variable de sortie est analysée dans un modèle linéaire aux douze facteurs de choix (six par échelle de décision) ainsi qu'à leurs interactions. Une procédure mixte permet de déterminer un critère de pertinence du modèle linéaire complet puis d'exclure ou d'ajouter au besoin les facteurs de choix. En fonction du critère de pertinence, la procédure indique les facteurs qui sont déterminants pour prédire la variable de sortie. La comparaison des résultats obtenus par variable de sortie, puis entre agent, aide à évaluer l'intérêt relatif des différents facteurs intégrés dans les fonctions de choix (postulat 1). Cette procédure utilise le critère d'information d'Akaike (*AIC*). Pour une variable de sortie donnée, l'*AIC* est déterminé pour chaque modèle linéaire successivement itéré dans la procédure. L'*AIC* la plus faible indique le modèle statistique le meilleur (Burnham and Anderson 2002, Ezanno et al. 2005). Deux précautions ont été prises dans cette procédure. D'abord, nous avons vérifié l'hypothèse de normalité sur la distribution de chaque variable de sortie ajustée. Ensuite, nous avons estimé la pertinence même de la procédure en analysant la part expliquée par les facteurs de choix dans la variance de la variable de sortie (*ANOVA*) et en déterminant le coefficient de détermination (R^2) du modèle linéaire retenu par l'*AIC*. Chacune des 43 125 simulations contribue à cette analyse. Ce n'est pas une analyse du lien entre les facteurs de choix et la validité des simulations, mais bien entre les facteurs et les variables simulées.

En complément, nous cherchons à comparer les combinaisons de facteurs permettant des simulations jugées valides. Cela revient à comparer la variabilité de 3 tableaux. Mais dans l'analyse classique des *K*-tableaux (Thioulouse and Chessel 1987), les tableaux doivent avoir les mêmes dimensions. Or les simulations valides ne sont pas au même nombre selon les agents. Nous utilisons alors la procédure *Statis*. Cette procédure est basée sur le principe de l'analyse en composantes principales (*ACP*) et permet de déceler quels sont les tableaux qui se ressemblent, et de décrire les différences entre tableaux (Lavit et al. 1994). Cette démarche nous permet d'estimer si un compromis de combinaisons robustes est possible (postulat 2).

Nous déterminons alors les probabilités par facteur de choix (i.e. pour les douze facteurs) pour avoir une valeur donnée dans les combinaisons des simulations validées, à la fois pour l'agent 1 et l'agent 2 (agents initialisés dans des conditions réalistes). Alors qu'un compromis semble possible, nous cherchons à analyser la stabilité des sorties des agents en répétant un certain nombre de combinaisons d'intérêt.

1.3.3. Evaluation des compromis robustes de combinaisons de facteurs et intégration d'un processus d'ingestion. Les méthodes mises en œuvre pour l'analyse du modèle complet, *PastoTrop.v2.1*, ont permis de sélectionner 640 compromis. Chaque compromis est répété dix fois, afin d'obtenir un taux de validation des simulations. Le nombre de répétitions choisi correspond une fois encore à un compromis entre le temps de simulation et le besoin d'évaluer la stabilité des sorties générées et des trajectoires des agents, vu les choix de programmation. La version utilisée (*PastoTrop.v2.2*) a été complexifiée car les agents sont dotés d'un processus d'ingestion. C'est une étape nécessaire dans le cheminement méthodologique vers l'association entre les performances individuelles et les caractéristiques du parcours et des circuits. En effet, c'est par l'ingestion au cours du circuit que les bovins constituent les apports qui, en regard des besoins, déterminent leurs performances.

A ce stade de modélisation, il n'y a pas encore d'objectifs de prédiction des performances individuelles, ni de prise en compte de l'impact des troupeaux sur le parcours. C'est pourquoi, malgré une correspondance entre agent et troupeau, l'attribut de vitesse d'ingestion (VI) d'un agent représente la VI (Tab. 2) d'un individu moyen en MSS. Toutefois, nous avons mis en évidence d'une part l'effet saison sur les VI et d'autre part, des problèmes de surestimation des QI par l'accumulation des VI instantanées au cours du parcours. En effet, nous ne maîtrisons pas assez bien le temps réel d'ingestion, au sein des périodes de pâturage (cf. chapitre 1, § 3.3.). Nous n'avons pas pu maîtriser l'erreur qu'introduit l'utilisation de ces modèles de VI propres à chaque type de couvert dans la prévision des QI. Dans notre approche exploratoire, nous avons alors juxtaposé deux autres méthodes du processus d'ingestion, testées en complément des prédictions des VI instantanées à partir des biomasses. (1) Nous avons mis en évidence empiriquement que l'accumulation de matière sèche ingérée par les VI instantanées estimées, ramenées au temps de pâturage-déplacement mesuré, correspondait à environ trois fois les QI évaluées (non publié). Nous avons donc élaboré une méthode test où les VI sont systématiquement divisées par trois. (2) Nous avons aussi suggéré une méthode alternative à partir des QI, qui pourrait être intéressante à l'échelle d'une saison donnée, sur parcours homogène. Les QI ont été estimées en moyenne à 3,6 kg MS/j pour un bovin moyen en MSS ($n = 111$). Nous avons ramené ces QI par unités de temps observées de pâturage-déplacement. Cette nouvelle VI constante par unité de temps est testée puisqu'elle permet également d'accumuler de la matière sèche pendant le temps de pâturage-déplacement qui émerge dans les simulations. Cette option de modélisation sera discutée plus loin. Elle entraîne une perte d'information, localement, dans le processus d'ingestion, mais peut représenter une approximation satisfaisante à ce stade du travail.

L'intérêt de l'introduction de l'ingestion est double : elle permet de localiser les prélèvements et elle peut conduire à l'estimation des performances animales. Toutefois, compte tenu des difficultés rencontrées, les quantités prélevées, émergeantes à la fin d'une simulation, selon ces trois méthodes doivent être comparées et validées. A l'analyse conventionnelle de la validité des répétitions des 640 combinaisons a priori valides, nous discutons plus finement les séquences de végétation fréquentée au cours des circuits, les QI et les compositions de régimes émergeant de l'ingestion à chaque pas de temps sur les cellules traversées.

Pour conclure ce Matériels et Méthodes, nous présentons dans le Tableau 6 un récapitulatif des étapes précédemment décrites.

Tableau 6. Etapes de travail dont le présent papier rend compte. Les étapes d'observations et de développement de la version v1 du modèle PastoTrop sont l'origine logique des étapes suivantes, et ont été préalablement explicitées dans le manuscrit de thèse.

Etape	Description	Référence dans le texte	Motivation	Résultats préalables
Observations	Ingestion	Chapitre 1 et 1.1.3.	Collecter des données pour décrire le système	Ingestion sur parcours
	Comportement spatial	Chapitre 2 et 1.1.3.		Caractérisation des circuits
Modèle préliminaire : PastoTrop.v1	Une règle de choix = combinaison linéaire à 3 facteurs non liés à la ressource	Chapitre 2	Etudier l'intérêt de facteurs non liés à la végétation dans la représentation	4 postulats (cf. 1.2.2.)
Recherche d'un calibrage robuste des choix spatialisés des agents : PastoTrop.v2.1	Définition de la végétation, selon plusieurs échelles d'hétérogénéité et d'une combinaison linéaire à 6 facteurs, 3 non liés et 3 liés à la végétation	1.3.1.	Intégrer des facteurs liés à la végétation pour faciliter le réalisme de la représentation	-
	Recherche d'une hiérarchie des facteurs selon leurs influences respectives sur les variables de sorties	1.3.2.	Hiérarchiser l'importance des facteurs <i>a priori</i> afin de limiter le nombre de combinaisons à tester	-
	Comparaison entre agents des pondérations de facteurs ayant validé des simulations		Rechercher un calibrage des règles de choix commun aux agents	Détermination de combinaisons validant des simulations, communes aux 3 agents
	10 répétitions de ces combinaisons et analyse du nombre de répétitions validées		Analyse de la stabilité des variables de sorties	-
Détermination probabiliste d'un compromis entre agents 1 et 2	Rechercher un calibrage des règles de choix commun aux agents	-		
Intégration de l'ingestion : PastoTrop.v2.2	Intégration des vitesses d'ingestion et des modèles Michaëlis-Menten	1.3.3.	Affiner la représentation et l'analyse du modèle par les régimes alimentaires simulés	-

2. RESULTATS

Les résultats concernent les simulations conduites sous les versions intégrant les six facteurs de choix (déclinés globalement et localement), sans les processus d'ingestion (version dénommée ci-après PastoTrop.v2.1), puis avec les processus d'ingestion (dénommée ci-après PastoTrop.v2.2). Les règles de décision, à l'échelle globale des unités de végétation et à l'échelle locale des cellules de végétation, sont la combinaison linéaire de six facteurs non liés et qui dépendent de la ressource végétale. Notre objet d'étude est le calibrage des règles de décision. Pour cela, il est

nécessaire de tester différentes combinaisons, dans le domaine de définition de chaque facteur, et de valider ou non les simulations induites par chaque combinaison testée. Cette partie est composée de trois étapes : (1) une analyse hiérarchique des facteurs impliqués dans la règle de choix des zones de végétation et la recherche d'un compromis de combinaisons de facteurs pour tous les agents, (2) une analyse spatiale affinée des circuits simulés à partir de combinaisons d'intérêt et (3) une analyse de l'ingestion des agents à partir des combinaisons d'intérêt.

2.1. Recherche d'une hiérarchie entre les facteurs et d'un compromis robuste pour les agents

Les sorties des 43 125 simulations effectuées par PastoTrop.v2.1 (cf. § 1.3.2.) du modèle ont été comparées aux valeurs observées des variables du Tableau 1. Si sur le terrain, il n'a pas été mis en évidence un effet significatif de l'éloignement entre parc de nuit et point d'eau sur les distances parcourues entre troupeau, en MSS (test t : $P = 0,71$, $n = 11$), il y a un ratio de 1,43 en moyenne pour le rapport entre les distances parcourues par l'agent 1 et celles parcourues par l'agent 2. Pour l'agent 3, nous avons donc décidé que l'intervalle du critère des distances parcourues serait augmenté proportionnellement à l'éloignement entre parc et point d'eau. Les simulations validées sont au nombre de 627, 779 et 341, respectivement pour les agents 1, 2 et 3. Le nombre élevé de validations obtenues avec les agents 1 et 2, s'expliquent par le fait qu'ils étaient placés initialement en situation réaliste par rapport aux aménagements. L'agent 3, positionné très loin des deux attracteurs, s'est trouvé invalidé deux fois plus souvent. Globalement, dans cette phase exploratoire, ayant testé une large plage de pondérations, seules 4 % d'entre elles se sont trouvées validées (1 747 / 43 125).

2.1.1. Recherche de hiérarchie entre les facteurs par l'application d'une méthode statistique analytique. Pour chaque agent, à l'issue des 43 125 simulations, chacune des cinq variables de sorties (i.e. hors adéquation entre unités de végétation choisies et effectivement rejointes) a été analysée par un modèle linéaire selon douze facteurs de choix (globaux : G et locaux : L) :

$$\text{Modèle } i = \text{modèle linéaire (variable } i \sim [\sum_{j=1}^{12} \text{facteur } j + \sum_{k=1}^{66} \text{interactions } k]) \quad [3]$$

L'évaluation est basée sur une procédure reposant sur les AIC (cf. § 1.3.2.). Il nous est apparu judicieux de chercher les facteurs qui expliqueraient le mieux la variabilité entre les circuits simulés. Cependant, pour chaque variable, les facteurs envisagés n'expliquent qu'une part réduite de la variabilité ($R^2 < 0,40$). Nous présentons toutefois les six premiers facteurs (Tab. 7) qui contribuent le plus aux variations des sorties.

Bien que les modèles d'ajustement obtenus soient assez peu explicatifs, quatre conclusions ont été formulées. (1) Les facteurs explicatifs ne sont pas les mêmes selon les variables et selon les agents. Toutefois, certains facteurs apparaissent très fréquemment alors que d'autres n'apparaissent jamais. D'une manière générale les facteurs locaux (L) sont mieux représentés : la biomasse, l'indice d'énergie, l'indice d'azote et l'attracteur au prochain aménagement à atteindre. En revanche, les facteurs de choix à l'échelle globale (G) n'apparaissent pas, à part l'indice d'azote et surtout la moindre distance à parcourir. Cela signifie que (2) ce sont les facteurs locaux qui auraient le plus de poids dans la variabilité des circuits et donc sur leur probabilité d'être valides. (3) Ensuite, nous trouvons des facteurs liés aux caractéristiques de la végétation (biomasses et leurs valeurs énergétiques ou azotées), au même niveau que le facteur d'attraction au prochain aménagement à atteindre. En outre, (4) les critères de validation des activités semblent redondants puisque les variables de sorties correspondantes sont ajustés identiquement ou très similairement. En effet, dans l'émergence de ces deux activités, l'une est strictement complémentaire à l'autre.

Compte tenu du faible pouvoir explicatif de ces analyses statistiques, et d'un ordre assez instable entre facteurs, nous pouvons suspecter le manque d'indépendance statistique entre les

facteurs. En conclusion, si nous confirmons du point de vue logique l'importance des facteurs locaux, nous ne disposons pas de moyens objectifs pour en éliminer certains.

Tableau 7. Hiérarchisation pour chacune des variables de sortie des 6 premiers facteurs explicatifs de la variabilité des circuits simulés, par ordre décroissant d'importance d'explication (de 1 à 6). Les six premiers facteurs sont sélectionnés par une procédure d'AIC appliquée à un modèle linéaire d'ajustement du critère donné par les 12 facteurs de choix (à l'échelle globale : G, ou locale : L) et leurs 66 interactions.

Variables de sortie	Ordre	Facteurs		
		Agent 1	Agent 2	Agent 3
durée du parcours (h)	1	attracteur L	azote L	biomasse L x azote L
	2	énergie L x azote L	biomasse L	biomasse L
	3	azote L	biomasse L x azote L	attracteur L
	4	biomasse L x azote L	attracteur L x énergie L	azote L
	5	biomasse L x énergie L	énergie L	énergie L
	6	énergie L	attracteur L x azote L	azote G
durée entre départ et abreuvement (h)	1	attracteur L	attracteur L	azote L
	2	attracteur L x énergie L	biomasse L	énergie L
	3	attracteur L x biomasse L	moins distance G	moins distance G
	4	attracteur L x azote G	biomasse L x azote L	azote G
	5	énergie L	azote G	attracteur L x biomasse L
	6	azote L	biomasse L x énergie L	azote L x énergie L
distance quotidienne (km)	1	azote L	biomasse L x azote L	attracteur L x azote L
	2	biomasse L x azote L	biomasse L	azote L
	3	biomasse L	énergie L	biomasse L x azote G
	4	attracteur L	azote L	biomasse L x énergie L
	5	moins distance G	attracteur L x énergie L	azote G
	6	attracteur L x biomasse L	moins distance G	attracteur L
activité pâturage-déplacement (%)	1	biomasse L	biomasse L x azote L	biomasse L
	2	azote L	biomasse L	azote L
	3	biomasse L x azote L	azote L	biomasse L x azote L
	4	attracteur L	azote L x énergie L	attracteur L x énergie L
	5	attracteur L x énergie L	attracteur L x énergie L	attracteur L x azote L
	6	moins distance G	moins distance G	moins distance G
activité déplacement (%)	1	biomasse L	biomasse L x azote L	biomasse L
	2	azote L	biomasse L	azote L
	3	biomasse L x azote L	azote L	biomasse L x azote L
	4	énergie L	azote L x énergie L	attracteur L x énergie L
	5	moins distance G	attracteur L x énergie L	attracteur L x azote L
	6	attracteur L x énergie L	moins distance G	moins distance G

2.1.2. Evaluation de la pertinence de recherche d'un compromis de combinaisons de facteurs par l'application d'une méthode statistique descriptive. Nous avons donc considéré que la combinaison linéaire des facteurs de choix était bien une voie pragmatique pour faire réagir les agents aux parcours. Nous avons voulu nous assurer que la recherche d'un compromis était pertinente. Pour ce faire, contrairement à l'analyse précédente sur l'ensemble des simulations

effectuées, nous avons comparé les combinaisons des simulations validées par agent ($n = 1\ 747$), à l'aide d'une procédure utilisant l'ACP. Les résultats sont portés sur la Figure 3.

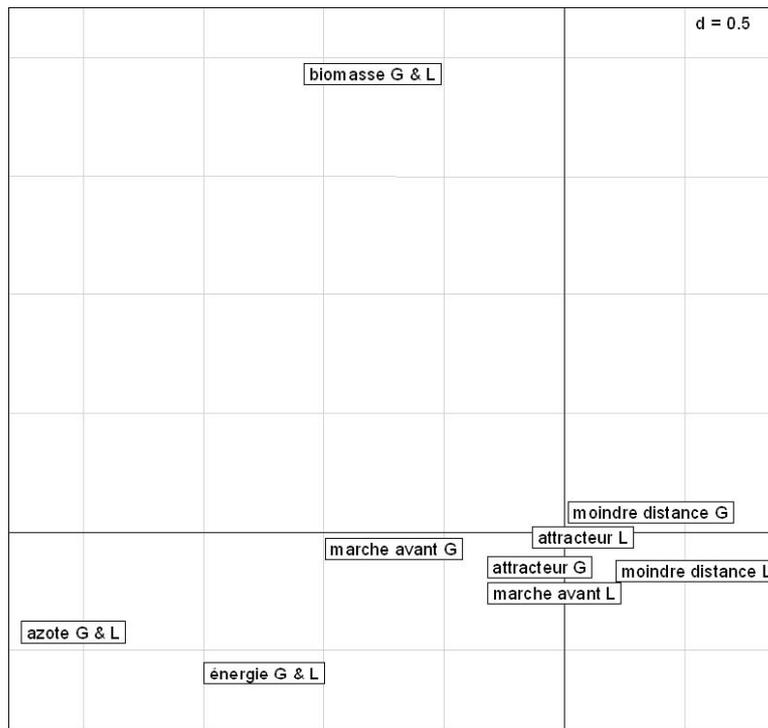


Figure 3. Répartitions des facteurs d'entrée du modèle PastoTrop (PastoTrop.v2.1) dans l'inter structure des tableaux par agent de combinaisons validées (méthode *Statis*). L'ensemble des facteurs est projeté, soit douze facteurs insérés dans les règles de choix global (G) et local (L). Schématiquement, plus les facteurs sont éloignés du centre, plus ils sont explicatifs de la variabilité des simulations.

Il faut bien comprendre que la procédure *Statis* que nous avons utilisé (cf. § 1.3.2.) permet exactement de décrire les points communs et les variations entre plusieurs tableaux, afin de statuer sur l'équivalence potentielle de ces tableaux. Cette procédure fournit les valeurs propres (i.e. importance des axes dans l'explication de la variabilité), les corrélations entre les agents, les corrélations des agents aux axes mais aussi la proposition d'une inter structure (i.e. la structure d'un agent moyen), qui renseigne sur les facteurs qui ont un effet similaire pour tous les agents et ceux qui contribuent à les distinguer (Fig. 3). L'interprétation des résultats: (1) tous les agents sont très corrélés. L'agent 2, initialement à une position intermédiaire entre l'agent 1 et l'agent 3 (Fig. 2), est très corrélé à l'agent 1 (0,90) de même qu'à l'agent 3 (0,90). L'agent 1, initialement dans une position extrême par rapport à l'agent 3, lui est bien corrélé également (0,86). La représentation d'un agent moyen (i.e. d'un compromis) est donc pertinente. On retrouve l'influence de la position initiale (i.e. de l'éloignement entre point d'eau et parc de nuit) sur ces corrélations, mais aussi sur la contribution des agents pour l'inter structure : égale, d'un peu moins d'un tiers pour les agents 1 et 3, et un peu plus d'un tiers pour l'agent 2.

(2) La projection des agents sur l'axe 1 de l'ACP (non montré) indique que l'agent 3 est superposé à l'axe 1 ($r = +1,00$), alors que, relativement, les agents 1 et 2 sont moins bien corrélés à cet axe (respectivement $r = +0,74$ et $r = +0,95$). Tout se passe comme si la corrélation entre un agent et l'axe 1 augmentait avec l'éloignement entre parc de nuit et point d'eau. (3) Les facteurs situés au centre du plan de l'ACP (Fig. 3) sont moins bien représentés par l'ACP. Cela signifie aussi qu'ils contribuent moins à la variabilité des combinaisons pondérant les facteurs, entre agents. Ainsi sur l'ensemble des combinaisons validées, les facteurs représentant le comportement spatial des animaux (attracteur, marche en avant et moins distance) sont moins discriminants que ceux qui représentent les végétations (biomasse, énergie, azote). (4) Pour un facteur donné, ses déclinaisons à l'échelle locale (L) ou globale (G) sont assez groupées. Cela signifie qu'à

l'échelle locale, comme à l'échelle globale, ce sont les facteurs liés à la ressource végétale qui causent le plus de variations entre les circuits validés.

Nous avons posé le postulat suivant : le facteur d'attraction au prochain aménagement à atteindre est nécessaire pour polariser le circuit sur les aménagements (postulat 1, cf. § 1.2.2.) et les autres facteurs contribuent à contrebalancer son effet. L'éloignement extrême entre point d'eau et parc de nuit de l'agent 3 doit avoir des conséquences sur la nature des simulations validées, avec une tendance à une moindre force des facteurs non polarisant sur les aménagements. C'est l'interprétation des liens entre agents avec l'axe 1 de l'ACP. Les pondérations des facteurs donnant des simulations validées sont plus variables pour l'agent 1. C'est particulièrement vrai pour les pondérations des facteurs liés à la ressource végétale. Quant à l'agent 2, il est dans une situation intermédiaire.

La procédure *Statis* nous a permis de justifier qu'un compromis est possible, malgré une influence probable de l'éloignement entre parc de nuit et point d'eau. Cette procédure ne nous permet pas en revanche de donner les pondérations du compromis. En tout cas, nous n'avons pas trouvé d'option, dans la procédure, l'indiquant. Donc, à ce stade de l'analyse, par le recoupement des 1 747 simulations validées entre agents, seules quatre combinaisons pondérant les facteurs de choix ressortent comme validant des simulations pour tous les agents (Tab. 8). Elles sont donc potentiellement les compromis robustes que nous cherchons.

Nous présentons les valeurs absolues des pondérations des facteurs qui, en réalité, sont soit positives, soit négatives. Les facteurs relatifs à la moindre distance à parcourir et à l'attraction aux aménagements sont des pénalités, pondérés négativement : plus une zone testée est éloignée de la position courante ou de l'aménagement à atteindre, plus son score partiel lié au facteur est négatif. Les autres facteurs sont pondérés positivement. Il est à noter que le facteur local de moindre distance est éteint. Il semble donc mieux valoir que les agents, localement, ne soient pas contraints à rester sur place (c'est ce que ce facteur prévoit).

Tableau 8. Pondérations robustes des combinaisons linéaires des facteurs de choix des agents du modèle PastoTrop.v2.1. Ces résultats sont issus de 43 125 combinaisons testées, non répétées.

échelle de la règle de décision	facteur	compromis des pondérations			
		comp1	comp2	comp3	comp4
unité de végétation (échelle globale : G)	attracteur G	0,75	1,00	1,00	1,00
	moindre distance G	0,25	0,50	0,75	0,25
	marche en avant G	0,75	0,25	0,50	0,25
	biomasse G	0,50	0,25	0,25	0,50
	indice d'énergie G	0,25	0,50	0,50	0,00
	indice d'azote G	0,25	0,25	0,25	0,50
cellule de végétation (échelle locale : L)	attracteur L	1,00	0,75	0,75	1,00
	moindre distance L	0,00	0,00	0,00	0,00
	marche en avant L	0,25	0,25	0,25	0,25
	biomasse L	0,75	0,25	0,25	0,50
	indice d'énergie L	0,25	0,50	0,50	0,00
	indice d'azote L	0,25	0,25	0,25	0,50

Nous avons alors cherché à affiner l'analyse : ces quatre pondérations génèrent-elles des sorties stables ? Nous avons donc répété dix fois chacune des quatre combinaisons afin d'en tester le taux de validation. C'est-à-dire que chacune des simulations est soumise aux six critères de validation. Le nombre de simulations validées d'une même combinaison, ramené au nombre de répétitions, constitue le taux de validation. De cette opération, une seule simulation est validée pour l'agent 1, dix pour l'agent 2 et zéro pour l'agent 3. Dans le Tableau 9, nous présentons les résultats de simulation (i.e. variables de sortie) pour le compromis 1 : ceux obtenus initialement

dans la série des 43 125 simulations, puis ceux des dix répétitions. Pour information, l'ensemble des résultats de simulation pour les quatre compromis, présentés Tableau 8, est donné dans l'Annexe 7.

Tableau 9. Valeurs des variables de sortie issues des simulations permises par la combinaison des valeurs du compromis 1, Tableau 8.

Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation
		durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâture-déplacement (%)	activité déplacement (%)	
agent 1	initiale	8,0	5,0	5,4	69	21	OUI
	1	9,8	3,3	9,1	56	34	non
	2	9,8	3,5	9,4	55	35	non
	3	9,8	3,3	9,3	58	32	non
	4	9,8	3,4	10,2	48	42	non
	5	9,8	3,3	8,5	60	30	non
	6	9,8	3,2	9,8	55	35	non
	7	9,8	3,4	9,8	53	37	non
	8	9,8	3,5	10,3	52	38	non
	9	9,8	3,3	9,4	56	34	non
10	9,8	3,3	9,1	58	32	non	
agent 2	initiale	9,8	5,0	11,1	74	16	OUI
	1	13,5	2,9	17,3	36	54	non
	2	9,8	5,0	8,5	62	28	OUI
	3	9,8	4,6	10,8	47	43	non
	4	8,0	4,3	9,0	46	44	non
	5	9,8	5,0	8,5	63	27	OUI
	6	7,7	4,3	5,2	65	25	non
	7	9,8	4,3	6,4	46	44	non
	8	8,8	3,8	11,7	32	58	non
	9	9,8	4,8	8,0	66	24	OUI
10	9,8	3,4	12,1	39	51	non	
agent 3	initiale	9,8	5,0	8,7	74	16	OUI
	1	12,3	4,7	14,7	40	50	non
	2	12,5	4,0	14,5	43	47	non
	3	12,5	4,6	16,0	32	58	non
	4	12,9	4,5	16,2	38	52	non
	5	12,8	5,8	14,3	43	47	non
	6	12,2	4,3	8,5	58	32	non
	7	11,9	5,8	14,2	37	53	non
	8	12,8	5,6	15,7	37	53	non
	9	12,2	4,3	7,0	65	25	non
10	11,7	4,9	14,4	33	57	non	

Comme déjà dit, l'agent 2, en position intermédiaire, a plus souvent ses variables de sortie dans l'intervalle observé (Tab. 1). Les variables temporelles semblent au point, surtout pour l'agent 1 et l'agent 2. C'est plus problématique pour l'agent 3. Relativement aux distances

parcourues, la variable simulée est généralement surestimée, surtout chez l'agent 1, puis chez l'agent3, d'après ces résultats. Enfin, il y a une tendance de sur-représentation des déplacements, aux dépens de l'activité de pâturage-déplacement. La répétition des simulations met à mal les résultats présentés dans le Tableau 8. Ce résultat complémentaire invalide le postulat 4 (faible utilité de répéter les simulations d'une combinaison donnée, cf. § 1.3.2.). De ce fait, nous nous sommes de nouveau interrogés sur la possibilité de trouver un compromis pour tous les agents.

2.1.3. Détermination probabiliste de combinaisons et tests de validité. Notre objectif est toujours de parvenir à un calibrage robuste et parcimonieux des règles de décision des agents. Nous avons déjà déterminé des pondérations pertinentes mais finalement non robustes (Tab. 8). Nous nous sommes alors intéressés à la stabilité des sorties de simulation. Cela nécessite de répéter une même combinaison et de déterminer le taux de validation. Pour ne pas compliquer la démarche, nous avons choisi de supprimer l'agent 3, initialement dans des conditions non réalistes, de l'analyse.

Nous avons calculé les probabilités d'occurrence des valeurs de pondération sur les combinaisons validées, pour les agents 1 et 2, les pondérations ayant été discrétisées par pas de 0,25 et l'espace étudié ayant été restreint suite aux options retenues précédemment (de 0,75 à 1,00 pour les facteurs abiotiques d'attraction aux aménagements et de 0 et 0,75 pour les autres facteurs : cf. § 1.3.2.). Ces probabilités par facteur ont été déterminées par agent, à partir des simulations validées précédemment (i.e. $n = 627$ pour l'agent 1 et $n = 779$ pour l'agent 2). La probabilité minimale requise a été fixée empiriquement à 0,25. Ainsi pour un facteur donné, la valeur d'une pondération est exclue lorsque la probabilité d'occurrence est inférieure à ce seuil, pour au moins un des deux agents considérés. Pour chaque facteur, au moins une valeur, et jusqu'à trois, de pondération est déterminée.

Tableau 10. Valeurs absolues conservées des pondérations des facteurs combinés dans les processus de décision des agents Troupeaux.

échelle de la règle de décision	facteur	valeur de pondération		
		a	b	c
unité de végétation (échelle globale : G)	attracteur G	0,75	1,00	-
	moindre distance G	0,75	0,25	-
	marche en avant G	0,25	-	-
	biomasse G	0,25	0,50	-
	indice d'énergie G	0,50	0,25	-
	indice d'azote G	0,75	0,50	0,25
cellule de végétation (échelle locale : L)	attracteur L	0,75	1,00	-
	moindre distance L	0,00	-	-
	marche en avant L	0,25	-	-
	biomasse L	0,50	0,25	-
	indice d'énergie L	0,50	0,25	-
	indice d'azote L	0,75	0,50	0,25

Le résultat de ces calculs de probabilités permettent d'ordonner les valeurs (si au moins deux) de pondération selon un gradient décroissant de probabilité : a, puis éventuellement b et c. Par exemple 0,75 et 1,00 pour le facteur global (G) d'attraction aux aménagements, et 0,75 puis 0,50 et 0,25 pour le facteur local (L) relatif à l'azote (Tab. 10). Des quatre combinaisons présentées dans le Tableau 8, certaines pondérations pour un facteur donné sont éliminées (cf. la combinaison 2).

A ce stade, nous disposons de pondérations (a, b, c) des facteurs qui doivent déboucher sur des simulations valides selon nos critères d'évaluation (cf. § 1.2.2.). Les 43 125 simulations précédentes, issues de 43 125 combinaisons de facteurs, non répétées, ont constitué une phase exploratoire de réduction des possibilités. Nous avons pu réduire dans une certaine mesure les domaines d'existence des pondérations des facteurs, présentés dans le Tableau 8. Nous avons alors choisi de tester à nouveau les combinaisons possibles dans cet intervalle réduit d'existence des pondérations des facteurs, en répétant chacune des combinaisons testées. Il y aurait encore à explorer 1 152 permutations possibles. Afin de réduire ce nombre, nous n'avons retenu que 640 combinaisons. Pour cela nous avons choisi de contraindre les valeurs des indices d'azote, globalement et localement, puisqu'ils sont les seuls facteurs à avoir 3 valeurs possibles de pondération. Ils sont fixés à 0,75 et 0,50 dans un premier temps puis à 0,25 dans un second temps, ce qui élimine des combinaisons et détermine respectivement 512 puis 128 combinaisons possibles. Chacune des 640 combinaisons est répétée dix fois : nous avons procédé à 6 400 simulations.

La nécessité de faire ces simulations est liée à la difficulté à hiérarchiser les valeurs des facteurs dans la règle de choix, malgré des compromis probables (postulat 2 validé puis nuancé, cf. § 2.1.2.), et surtout au besoin d'analyser la stabilité des trajectoires des agents pour une combinaison validée, d'où les répétitions. Alors que la recherche d'un compromis paraissait possible à l'issue de l'analyse par la procédure *Statis*, les résultats de cette étape de validation sont d'abord surprenants et invalident encore une fois le postulat 4 (faible utilité de répéter les simulations d'une combinaison donnée, cf. § 1.3.2.). Dans le cas de l'agent 1, 73% des combinaisons possibles testées ont été validées au moins une fois. Mais le taux de validation pour chaque combinaison possible n'a pas dépassé 30%. Tout se passe donc comme si les combinaisons possibles étaient, en première approximation, aux trois quarts toutes efficaces pour simuler le comportement spatial des troupeaux bovins en libre pâture sur parcours agropastoral tropical, eu égard aux critères de validation, mais qu'en réalité les processus émergeant de ces combinaisons sont très instables, invalidant de ce fait la majorité des simulations. Quant à l'agent 3, seules 2 combinaisons possibles ont été validées, avec un taux de validation faible.

L'agent 1 est dans une situation extrême, vu le faible éloignement entre le point d'eau et son parc de nuit. Dans le cas de l'agent 2, dans une situation intermédiaire, l'analyse de validité est beaucoup plus discriminante : 48% des combinaisons possibles ont été validées, avec un taux de validation d'au moins 60%. C'est-à-dire qu'il y a près de la moitié des combinaisons possibles qui paraissent efficaces pour des simulations réalistes, et qu'elles assurent une bonne stabilité des sorties et des trajectoires des agents (certaines de ces combinaisons sont indiquées plus loin : celles dont le taux de validation est d'au moins 80%).

2.1.4. Allègement partiel de la procédure de validation. Pour comprendre l'origine de ces différences marquées entre agents, nous avons repris l'analyse de validation des simulations en supprimant un critère de validation à chaque fois. La suppression des contraintes temporelles (i.e. heures observées de passage au point d'eau puis de retour au parc de nuit) n'a pas de conséquence sur le taux de validation des simulations. En revanche, les suppressions des critères de distances parcourues et d'activités pâturage-déplacement et déplacement simple ont un effet majeur sur le taux de validation des simulations selon les agents. L'agent 1 est alors particulièrement pénalisé par le critère des distances parcourues, comme illustré à la Figure 4.

Alors que la valeur médiane des distances observées pour le petit troupeau, représenté par l'agent 1, en MSS, est de 4 200 m environ, la valeur médiane des distances simulées pour cet agent 1 est de 7 300 m. La Figure 4 montre que les distances simulées par les 640 combinaisons testées sont cohérentes jusqu'au troisième quartile environ, relativement aux critères observés, pour les agents 2 et 3. Le critère est donc « souple » pour ces deux agents. En revanche, il est très discriminant pour l'agent 1. Les distances émergentes sont peu satisfaisantes. Le critère est responsable de l'instabilité des sorties, dans la sélection de combinaisons pour l'agent 1. Lorsque l'on ne tient pas compte du critère des distances parcourues dans le processus de validation, il n'y a plus que 30% des 640 combinaisons possibles qui donnent au moins une simulation valide. Et leur taux de validation est d'au moins 60%. Nous discutons plus loin de la mauvaise simulation des

longueurs des circuits pour l'agent 1. En revanche, la suppression du critère des distances parcourues dans le processus de validation n'a pas d'impact sur les combinaisons sélectionnées pour les autres agents : ce sont exactement les mêmes que lors du processus de validation intégrant le critère des distances parcourues.

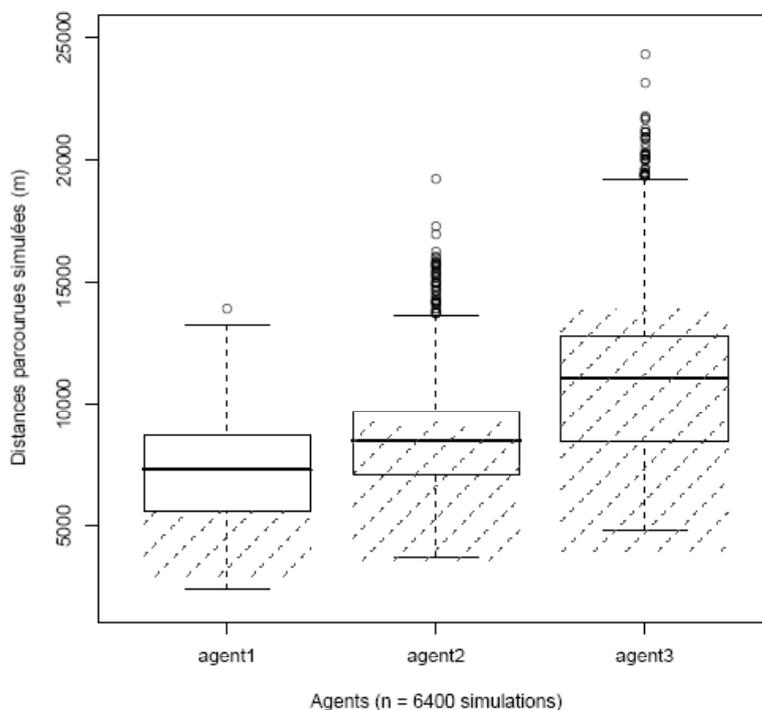


Figure 4. Distances parcourues quotidiennes simulées, en mètres, pour chaque agent. Les simulations résultent des 640 combinaisons testées, répétées 10 fois. Les zones en pointillés représentent les intervalles de distances observées (agents 1 et 2) ou extrapolées (agent 3). La superposition des variables simulées et observées permet leur comparaison.

A présent, en ce qui concerne les activités pâturage-déplacement et déplacement simple, l'impact de leur suppression dans le processus de validation sur le nombre de simulations validées est très significatif : 10 fois plus de simulations validées pour l'agent 1, 7 fois plus pour l'agent 2 et 700 fois plus pour l'agent 3, environ. La suppression conjointe des critères d'activités dans le processus de validation a un impact marqué sur tous les agents. Nous avons alors cherché à évaluer qualitativement si la suppression des critères liés aux activités avait la même signification pour les trois agents.

Tableau 11. Valeurs médianes des activités émergentes des agents, à partir des sorties des 640 x 10 simulations testées.

	activité émergente	
	pâturage-déplacement (%)	déplacement (%)
agent 1	54	36
agent 2	48	42
agent 3	38	52

Ces valeurs simulées (Tab. 11), comparés aux activités observées (Tab. 1), indiquent clairement une sous-représentation de l'activité pâturage-déplacement, au profit du déplacement simple. Le critère de validation basé sur les activités semble donc trop discriminant, pour tous les agents. Il y a un gradient de diminution du pâturage-déplacement avec l'augmentation de la

distance entre point d'eau et parc de nuit. Plus l'agent est initialement éloigné du point d'eau, plus il choisit localement, dans un rayon limité autour de sa position courante, des cellules éloignées de sa position courante, ce qui induit une activité Déplacement plus fréquente. De ce fait, l'agent 3 sera pénalisé davantage que l'agent 2, qui le sera davantage que l'agent 1, par rapport à ce critère, vu l'implémentation de la règle d'émergence de ces activités. Le constat est donc que les activités sont dans l'ensemble mal représentées par le modèle.

Nous discutons plus loin des contraintes générées par la prise en compte ou non des critères de distances parcourues et d'activités, dans la validation. Pour plus de stabilité des sorties simulées pour l'agent 1, nous avons choisi de ne retenir que les combinaisons qui ont un taux de validation d'au moins 80%, après avoir supprimé le critère des distances quotidiennes parcourues. Pour l'agent 2, les combinaisons retenues, avec un taux de validation d'au moins 80%, restent issues d'un processus de validation intégrant l'ensemble des critères fixés au départ (cf. § 1.2.2.). Dans la maille de 0,25, d'une valeur à l'autre, pour un facteur donnée, aucun compromis n'a été mis en évidence entre l'agent 1 et l'agent 2. Parmi les combinaisons les plus stables, par agents, nous présentons les 5 combinaisons (c1 à c5) les plus stables dans le Tableau 12.

Tableau 12. Valeurs absolues des combinaisons de pondérations retenues pour les facteurs de choix. Ces combinaisons validées (sans le critère des distances quotidiennes pour l'agent 1) assurent une stabilité des sorties d'au moins 80%.

agent	échelle de la règle de décision	facteur	valeur de pondération				
			c1	c2	c3	c4	c5
agent 1	unité de végétation (échelle globale : G)	attracteur G	0,75	1,00	1,00	0,75	0,75
		moins distance G	0,25	0,25	0,25	0,75	0,75
		marche en avant G	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		biomasse G	0,25	0,25	0,50	0,50	0,25
		indice d'énergie G	0,25	0,25	0,50	0,25	0,50
	indice d'azote G	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
	cellule de végétation (échelle locale : L)	attracteur L	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
		moins distance L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		marche en avant L	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		biomasse L	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
indice d'énergie L		0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
indice d'azote L	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50		
agent 2	unité de végétation (échelle globale : G)	attracteur G	0,75	1,00	0,75	0,75	1,00
		moins distance G	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
		marche en avant G	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		biomasse G	0,50	0,25	0,50	0,25	0,25
		indice d'énergie G	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50
	indice d'azote G	0,75	0,25	0,25	0,25	0,25	
	cellule de végétation (échelle locale : L)	attracteur L	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		moins distance L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		marche en avant L	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		biomasse L	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25
indice d'énergie L		0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
indice d'azote L	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25		

Ce sont ces combinaisons qui sont retenues pour les simulations qui sont analysées plus finement dans la partie suivante, par l'étude des séquences de végétation fréquentées par les agents,

et par les temps de résidence. De même, ce sont ces combinaisons qui sont retenues pour établir les régimes alimentaires et les quantités ingérées quotidiennes émergeant des simulations. La version du modèle PastoTrop.v2.1 qui a été modifiée en utilisant ces pondérations sera dénommée PastoTrop.v2.2.

Comme pour les combinaisons du Tableau 8 répétées 10 fois, pour lesquelles nous avons présenté les variables de sorties dans le Tableau 9 et dans l'Annexe 7, nous présentons les variables de sorties des combinaisons du Tableau 12 dans le Tableau 13. Encore une fois, cela répond à un souci de transparence. Toutefois, nous proposons uniquement ici les sorties des combinaisons dénommées c1. Les autres ont également été reportées dans l'Annexe 7.

Tableau 13. Valeurs des variables de sortie issues des simulations permises par la combinaison des valeurs du c1 (différent entre l'agent 1 et l'agent 2), Tableau 12.

Compro- mis x Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation (sans critère distance quotidienne)	Validation (totale)
		durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâturage- déplacement (%)	activité déplacement (%)		
c1 agent 1	1	9,8	4,4	7,1	69	21	OUI	<i>non</i>
	2	9,8	4,3	6,2	68	22	OUI	<i>non</i>
	3	9,8	4,4	6,9	66	24	OUI	<i>non</i>
	4	9,8	4,3	5,9	72	18	OUI	<i>non</i>
	5	9,8	4,3	7,3	69	21	OUI	<i>non</i>
	6	9,8	4,2	6,1	71	19	OUI	<i>non</i>
	7	9,8	4,4	6,2	74	16	OUI	<i>non</i>
	8	9,8	4,3	6,4	69	21	OUI	<i>non</i>
	9	9,8	4,3	6,2	71	19	OUI	<i>non</i>
	10	9,8	4,4	6,6	68	22	OUI	<i>non</i>
c1 agent 2	1	9,8	4,3	7,1	70	20	OUI	OUI
	2	9,8	4,3	6,4	75	15	OUI	OUI
	3	9,8	4,3	8,0	64	26	OUI	OUI
	4	9,8	4,0	6,9	69	21	OUI	OUI
	5	9,8	4,3	7,1	69	21	OUI	OUI
	6	9,8	4,3	7,4	68	22	OUI	OUI
	7	9,8	4,3	7,4	69	21	OUI	OUI
	8	9,8	4,3	6,6	72	18	OUI	OUI
	9	9,8	4,3	6,6	73	17	OUI	OUI
	10	9,8	4,3	6,5	74	16	OUI	OUI

Dans l'ensemble, comme déjà dit (Fig. 4), les distances parcourues sont problématiques pour l'agent 1.

2.2. Analyse spatiale des circuits simulés

Nous avons affiné l'analyse des circuits validés, par deux méthodes quantitatives. La première a consisté à calculer et analyser les temps de résidence des agents sur le territoire. La seconde concerne les proportions du temps passé par unité de végétation. Ces analyses complémentaires ont été effectuées sur les résultats des simulations issues des combinaisons présentées dans le Tableau 12, pour les agents 1 et 2 ; les seuls pour lesquelles les conditions initiales sont réalistes.

2.2.1. Analyse des circuits par la méthode des temps de résidence. Les circuits observés en MSS ont été analysés par la méthode des temps de résidence (Fig. 5.a, cf. chapitre 2, § 1.3.3.). Ceci permet un découpage objectif en périodes relativement homogènes d'activités des bovins. Les temps de résidence des agents au cours des circuits simulés (Fig. 5.b) sont assez proches de ceux calculés sur les données observées. Ces courbes des temps de résidence (Fig. 5.b) est la moyenne des courbes de temps de résidence de chacun des 50 circuits simulés par agent, issus des cinq combinaisons distinctes par agent (1 et 2, Tab. 12), répétées 10 fois. Dans la réalité du terrain, nous avons montré qu'il n'y avait pas de différence flagrante entre troupeaux (cf. chapitre 2, § 2.4.). Une superposition des courbes de temps de résidence des circuits simulés avec les celles des circuits observés, montre une assez bonne correspondance entre simulations et observations, d'une part, et entre simulations pour l'agent 1 et simulations pour l'agent 2 (en gras), d'autre part. Un type de courbes de temps de résidence concernant l'agent 1 est apparu à l'écart de l'enveloppe englobant les autres agrégats de courbes de temps de résidence des deux agents. Il s'agit de 15 simulations, sur les 100 effectuées. Nous n'avons pas analysé plus en avant si ces 15 simulations, concernant l'agent 1, justifiaient ou non une différenciation des courbes moyennes par agent. Nous avons choisi toutefois de distinguer les profils des temps de résidence simulés, par agent.

Les segments bornant les zones d'activité homogènes des circuits observés (Fig. 5.a) ont été placés également sur les courbes moyennes des circuits simulés (Fig. 5.b). Le découpage en 5 parties est bien conservé, on observe en revanche que les agents ont tendance à demeurer plus longtemps sur les unités de végétation rejointes après le départ du parc de nuit.

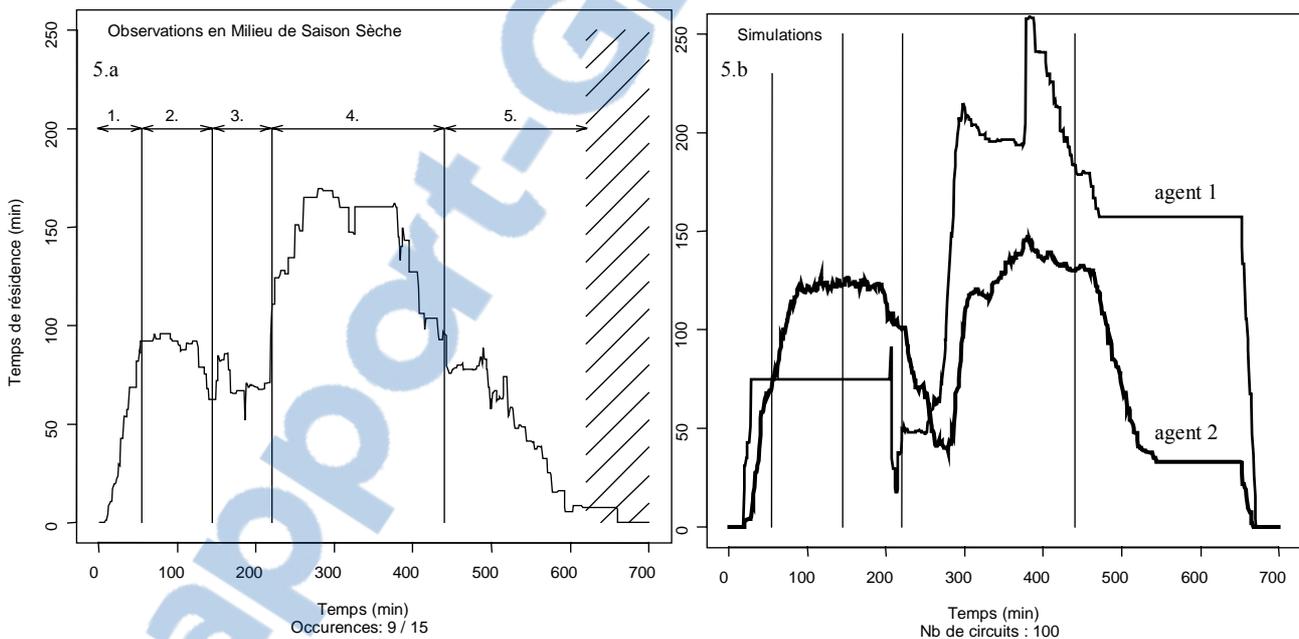


Figure 5. Courbes moyennes des temps de résidence des bovins observés (5.a) en milieu de saison sèche ou simulée (5.b) dans un environnement aux conditions proches du milieu de saison sèche. En 5.a, les troupeaux (1.) s'éloignent du parc de nuit pour (2.) atteindre des jachères où ils sont relativement stables et ingèrent des pailles de graminées. Ils rejoignent progressivement la rizière (3.) où ils s'abreuvent, et où ils restent stables le reste de la journée (4.) en consommant les pailles de riz. Enfin, ils quittent la rizière en fin de journée (5.), passant par les prairies sous palmeraie où ils ingèrent des herbacées diverses, mais principalement des graminées épiées, avant de rejoindre les alentours du parc de nuit. La zone hachurée englobe les temps où les animaux sont de nouveau à l'attache.

L'agent 1 semble mieux respecter les temps de résidence sur les unités de végétation, jusqu'au pic sur la rizière. Le plateau de fin de journée est artefactuel : l'analyse continue jusqu'à la fin des pas programmée des simulations, borne découplée de l'arrêt potentiel des agents. C'est-

à-dire que l'agent 1, comme l'agent 2, est immobile puisqu'arrivé, mais le programmeur tourne encore. Pour l'agent 2, on note la répétition de la maille entre deux aménagements. Ce profil conforte la situation intermédiaire de cet agent : il a « mécaniquement » les mêmes temps de résidence sur les unités de végétation, entre deux aménagements, selon l'attraction.

2.2.2. Comparaison des séquences d'unités de végétation visitées entre observations et simulations. Les temps de résidence ne renseignent pas directement sur les unités de végétation fréquentées. Il s'avère que la séquence d'unités visitées par les agents ne correspond pas tout à fait aux observations. En moyenne, les troupeaux observés passent plus de 200 min sur la rizière, depuis l'abreuvement jusqu'à l'approche de la fin de journée (seconde moitié de la période 3 et période 4, Fig. 5.a). Au cours des simulations, l'utilisation de la rizière apparaît limitée autour du moment d'abreuvement : au moment du creux des temps de résidence entre 200 et 300 min (Fig. 5.b). Cela conduit à estimer que les agents simulés exploitent davantage les unités cultivées, hors rizière, et les prairies graminéennes que les observés.

Depuis la version PastoTrop.v2.1, la définition de la végétation a été affinée par l'intégration de types de couverts dans les unités de végétation (cf. § 1.3.1.). Cela était nécessaire du fait de l'utilisation de facteurs liés aux caractéristiques de la végétation dans les fonctions de choix. Vu l'implémentation des types de couvert sur les unités cultivées (Tab. 5), les agents fréquentent majoritairement des cellules où la ressource consommable est de la litière. Nous discutons ce point plus loin. Mais cela risque d'introduire un biais dans l'estimation des régimes alimentaires.

2.3. Prédiction de l'ingestion et des régimes journaliers des bovins à partir des différentes méthodes d'implémentation de l'ingestion

Nous nous sommes attachés tout d'abord à faire émerger des quantités ingérées quotidiennes (QI) pour les agents 1 et 2 dans cette version complexifiée : PastoTrop.v2.2. Chaque simulation produit une QI. Par agent, il y a 50 simulations, 10 répétitions des cinq combinaisons données dans le Tableau 12. Nous comparons trois méthodes d'implémentation des vitesses d'ingestion (VI). Les QI émergentes par les trois méthodes de VI sont illustrées sur la Figure 6. La première méthode, « MM », est l'application des modèles de prédiction des VI à partir des biomasses disponibles (Bm), selon un formalisme de type Michaëlis et Menten, tels que nous les avons déterminés (cf. chapitre 1). Le détail des modèles est rappelé dans le Tableau 2. Un des problèmes posé par cette approche concerne la répartition des activités d'ingestion au cours du temps et sur les différents couverts (cf. chapitre 1). Les QI sont obtenues par sommation des consommations effectuées avec les VI qui dépendent des biomasses disponibles (Bm) lorsque l'agent est en pâturage-déplacement. L'application systématique de cette règle aboutit à des surconsommations journalières évidentes (> 20 kg MS/j, Fig. 6) par rapport à nos mesures ($1,5 < QIm = 3,6 < 6,3$ kg MS/j, $n = 111$ en MSS) obtenues par la collecte des fèces.

La méthode de l'ingestion « régulière » (cf. (2), § 1.3.2.) apparaît plus efficace pour approcher les QI : entre 3,6 et 5,8 kg MS/j pour l'agent 1 et entre 2,9 et 5,4 kg MS/j pour l'agent 2. Toutefois, cette méthode ne lie pas les VI aux biomasses, ce qui est contraire au paradigme de la réponse fonctionnelle (Ungar 1996). Nous discutons ce point plus loin. La méthode « MM forçage » résulte de la relation linéaire forcée par 0 entre les QI et les VI instantanées estimées à Saré Yoro Bana, par troupeau et par saison : les VI sont divisées systématiquement par 3 (cf. (1), § 1.3.2.).

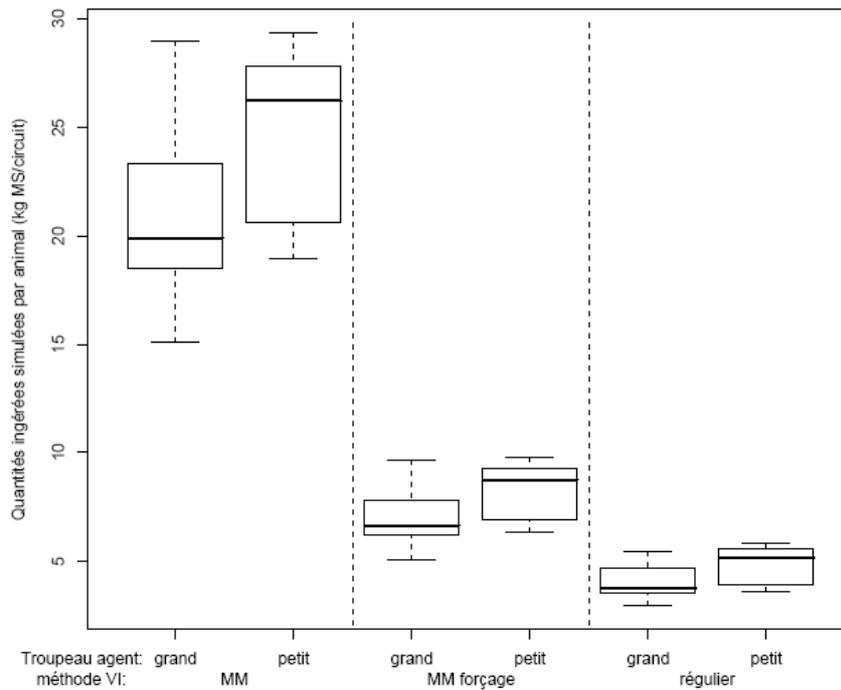


Figure 6. Variabilité des quantités ingérées (QI) des agents 1 (représentant un petit troupeau) et 2 (représentant un grand troupeau), estimées par trois méthodes. La méthode « MM » est l'application des modèles Michaëlis-Menten de prédiction des vitesses d'ingestion (VI) instantanées à partir des biomasses disponibles (Chirat et al. submitted-a). La méthode « MM forçage » résulte de la relation linéaire forcée par 0 entre les QI et les VI instantanées estimées à Saré Yoro Bana : les VI sont divisées systématiquement par 3. Enfin, la méthode de découpage « régulier » de l'ingestion fixe les VI constantes à chaque pas de temps, comme le résultat de la QI prévisionnelle divisée par le nombre de pas de temps prévu.

Nous avons alors pu estimer des compositions de régime, en quantifiant les prélèvements sur les types de couvert fréquentés avec les VI. La méthode (« MM », « MM forçage », « régulier », Fig. 6) de définitions des VI n'a de conséquence que sur les QI. Il n'y a pas eu d'incidence sur le régime alimentaire. L'interprétation du régime est présentée Fig. 7, superposée à la composition des régimes au cours du MSS (d'après Ickowicz and Mbaye 2001). Les régimes sont très similaires pour les deux agents 1 et 2. La litière est majoritairement consommée. Elle regroupe pailles de graminées et matériels ligneux. Quant aux résidus de cultures, ce sont majoritairement les pailles de riz qui sont représentées, à hauteur de 5% environ du régime. D'autres types de couvert sont consommés (cannes, feuilles de ligneux, graminées en épi, etc.) mais dans des proportions infimes. L'implémentation des règles de décision des agents entraînent une occupation de l'espace un peu différente de la réalité, ce qui a un effet sur la composition des régimes.

La Figure 7 montre une surestimation des quantités de graminées (sèches) et de ligneux dans le régime des agents. Cela est lié à la fréquentation trop élevée des aires de litière (cf. § 2.2.2.). Cela pose la question du calibrage de l'environnement (Tab. 3 & 5). Toutefois, aux herbacées diverses près, les régimes simulés des agents sont assez proches des régimes observés en fin de saison sèche.

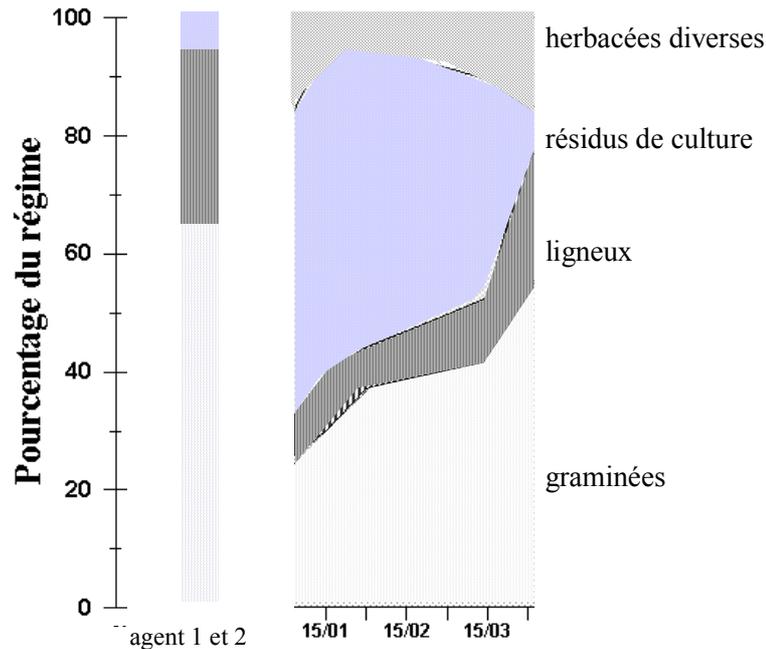


Figure 7. Composition des régimes des agents 1 et 2, comparés aux régimes observés à Saré Yoro Bana sur le milieu de saison sèche. Agent 1 et 2 représentent les valeurs simulées alors que la partie droite représente les régimes observés en MSS.

La composition des régimes simulés nécessite une description fine des ressources fourragère.

3. DISCUSSION

Les observations des processus d'ingestion (cf. chapitre 1) et de la structure des circuits des bovins N'Dama en libre pâture sur parcours agropastoraux tropicaux (cf. chapitre 2) ont donné des résultats originaux que nous avons ensuite intégrés dans un modèle de système de troupeaux bovins divaguant. L'objectif de cette modélisation est la représentation des circuits issus de règles d'orientation par lesquelles les agents réagissent aux aménagements ainsi qu'aux ressources végétales. Cette modélisation a englobé d'abord deux étapes de complexification des règles de choix : PastoTrop.v1 n'intègre que des facteurs non liés à la ressource dans la règle de choix (cf. chapitre 2) et PastoTrop.v2.1 contient une règle de choix complexifiée par l'ajout de facteurs liés à la ressource (Tab. 4). A ce module de spatialisation des choix, nous avons ensuite intégré un module d'ingestion (PastoTrop.v2.2). Dans la présente étape d'intégration de ces deux sous-modèles il nous a fallu contrôler simultanément la cohérence des options que nous avons prises : c'est ce que nous discutons ici.

3.1. Discussion du calibrage d'un modèle de système d'élevage divaguant en zone sèche

3.1.1. Introduction : une démarche exploratoire sur l'importance relative des facteurs. La version PastoTrop.v2.1 englobe trois agents Troupeaux, dont deux positionnés initialement dans des conditions réalistes, qui évoluent dans leur environnement grâce à un ensemble de règles par rapport aux entités végétales et aux aménagements, qui constituent le parcours. Il y a deux échelles de végétation, locale et globale. Les agents ont de ce fait deux règles de choix. Par parcimonie, ce sont les mêmes six facteurs normés qui sont déclinés localement et globalement, dans une combinaison linéaire qui attribue un score à chaque entité de végétation à toutes les échelles, lors d'une situation de choix. Le parcours est discrétisé en cellules de végétation (20 x 20 m) qui peuvent éventuellement porter un aménagement. Les cellules sont

agrégées en unités de végétation. D'une manière intermédiaire, les unités de végétation sont caractérisées par un ou plusieurs types de couverts. Une cellule n'appartient qu'à un type de couvert donné. C'est le couvert qui porte les attributs de végétation : biomasses disponibles et qualités de ces biomasses (Tab. 3).

Les 43 125 simulations produites sont à la base d'une démarche exploratoire. Sans idée *a priori* des liens entre facteurs de choix et variables de sorties, le nombre important de simulations nous a permis de proposer une analyse statistique d'explication de la variabilité des différentes sorties par les facteurs. La mise en place du processus de validation impliquant six critères dont cinq issus du terrain a assis notre volonté de réalisme de la représentation du comportement des agents. La recherche de compromis a d'abord été confortée par une démarche descriptive complémentaire (*Statis*) visant à justifier la pertinence de cette recherche. Finalement s'est posée la question de la stabilité des sorties issue d'une combinaison donnée. Il a alors été nécessaire de répéter les simulations. Nous discutons les résultats spécifiquement en § 3.2.

L'étape de modélisation suivante (PastoTrop.v2.2) a consisté à doter les agents de vitesses d'ingestion. C'est une étape nécessaire pour avancer sur la problématique d'intégration des consommations alimentaires localisées à partir des circuits quotidiens des troupeaux. Nous avons procédé à l'évaluation de ce modèle de recherche. L'évaluation des résultats de simulation permet un calibrage des fonctions qui reproduisent l'expression du comportement observé. Cette partie s'articule en trois temps : (1) nous commençons par discuter de l'originalité d'utiliser un SMA pour répondre à des objectifs zootechniques complexes. (2) Nous discutons ensuite des résultats principaux obtenus dans la partie précédente. Cette étape est nécessairement liée à la discussion des choix de modélisation, qui déterminent l'efficacité de la recherche de réalisme dans les simulations.

3.1.2. Justification des méthodes de calibrage des processus et d'analyse des résultats de simulation multi-agents. Les SMA sont indiqués comme outils pour les spécialistes qui cherchent à représenter un système complexe et hétérogène, en partie par leur architecture (encapsulations des entités et leurs méthodes) et leurs propriétés d'émergence (Ferber 1995). Ces SMA semblent pouvoir pallier les limites qu'ont les modèles analytiques à formaliser les effets cumulatifs des interactions au sein d'un système écologique, par exemple (Parsons and Dumont 2003). Les potentialités de l'outil n'exonèrent pas d'un effort de justification d'implémentation des règles de fonctionnement et du calibrage des processus simulés. Nous pensons que les difficultés inhérentes à ce genre de démarche sont liées à l'objectif prédictif que nous assignons au modèle. Au contraire, l'approche Animat (Watts 1998), qui prévoit de formaliser les interactions entre agents Animaux et leur environnement, utilise des « animaux artefactuels » (Ferber 1995), l'intérêt étant d'observer en quoi certaines règles améliorent le « fitness » des agents, et en quoi ces résultats aident à se rapprocher de la réalité. L'approche Animat ne chercherait pas la prédiction du « fitness » de vaches dans un environnement agropastoral tropical mais aiderait à comprendre certains mécanismes sous-jacents de leur comportement.

Lorsque l'utilisation du modèle recherche une prédiction d'évolution des ressources ou des agents, deux cas de figure se présentent. (1) Les agents sont les acteurs d'utilisation d'une ressource spatialisée et dynamique. Dans ce cas, la phase d'implémentation de l'architecture du modèle, jusqu'au calibrage des fonctions de base, résulte d'une approche participative avec les acteurs du terrain. Les scénarii modifiant les interactions entre les acteurs et les ressources répondent à une recherche prospective sur l'évolution du système. Les résultats des simulations de l'état du système à moyen ou long terme sont difficilement validés. Cependant, des validations intermédiaires, à court terme, permettant le calibrage du modèle sont possibles (D'Aquino et al. 2003, Bah et al. 2006). Il s'agit bien d'approche participative lorsqu'il y a mutualisation des usages de différents utilisateurs d'une ressource, afin d'une part de représenter une situation conforme aux pratiques et, d'autre part, une recherche de discussion consensuelle sur les évolutions possibles du système d'étude (FAO 1995). (2) Lorsque les agents ne sont pas des acteurs mais des objets animés d'un système agro-écologique, il devient nécessaire de s'appuyer sur des observations de terrain et de tester des règles informatiques de comportement. C'est là

l'intérêt de l'approche Animat. En un sens, le travail que nous avons mené est une approche Animat, avec une exigence de réalisme. La recherche de réalisme doit permettre de repousser les limites d'utilisation du modèle initial. Ainsi, Beecham et Farnsworth (1998) ont mis en évidence, grâce à leur modèle exploratoire du comportement de choix de ruminants dans un environnement hétérogène, que la prise en compte de la socialité comme contrainte supplémentaire dans le choix des patches est nécessaire pour augmenter l'efficacité du modèle individu-centré. La meilleure validité des simulations issues des règles intégrant la socialité des agents repose en partie sur un critère de quantités ingérées simulées, comparées aux références observées. Les agents ont deux phases d'activités calibrées qui se répètent au cours du temps, de déplacement puis d'ingestion. Le calibrage des règles résulte bien d'abord de l'interprétation des auteurs de la réalité. Notre démarche était similaire sur ce point.

En outre, il est reconnu que la modélisation « spatialement explicite » des trajectoires d'animaux nécessite une vaste base de données de terrain. C'est pourquoi certains auteurs ont souligné la difficulté de prévoir des choix de zones de végétation d'un territoire hétérogène par une approche connexionniste (cf. Davies 1989), c'est-à-dire intégrant de nombreuses composantes de réaction aux attributs de l'environnement, avec des pondérations données. Une approche de logique floue (cf. Coquelle et al. 2004) pourrait être plus simple à mettre en œuvre (Parsons and Dumont 2003). Mais cela nous a semblé revenir à proposer de compenser les erreurs d'implémentation des facteurs de choix par un ajustement non explicable du comportement des agents. C'est une démarche intéressante mais nous avons été gêné de l'approche moins cartésienne, risquant de nuire au réalisme recherché, d'autant que les agents sont sous hypothèse de rationalité (Pyke 1984).

Par ces éléments, nous rappelons qu'il n'y a pas de méthode reconnue et universelle pour (1) organiser un corps de règles de décision, (2) calibrer les facteurs de choix les uns par rapport aux autres et (3) valider les résultats des simulations. Une seule règle semble assez générale : appliquer le principe de parcimonie. Cela revient à procéder par étapes de complexification, en ne représentant des niveaux individualisés que lorsque le niveau agrégé a été calibré. C'est un garde-fou pour faciliter la maîtrise des processus simulés. Donc (1) à partir de théories du comportement (cf. conclusion partielle, chapitre 2) et d'observations de terrain, nous avons défini six facteurs combinés dans deux règles de choix de végétation, localement et globalement. La somme algébrique des facteurs est apparue comme un moyen pragmatique de représenter la réponse des bovins au parcours, par l'effet cumulé de ces différents facteurs. (2) Nous avons alors cherché à calibrer ces règles de choix, dans l'objectif d'utiliser sur le terrain les résultats des simulations, en les analysant avec le plus de critères possibles. C'était un moyen logique de parvenir à donner du réalisme à notre modèle. (3) Nous avons choisi une règle booléenne de validation des simulations : chaque variable de sortie correspond à un critère observé. Si chacune de ces variables est dans l'intervalle observé du critère correspondant, alors la combinaison testée est valide. Chaque critère nous étant apparu comme nécessaire (mais pas suffisant) au réalisme d'une simulation, nous avons considéré qu'il n'était pas possible de déterminer *a priori* une hiérarchie entre ces critères.

3.2. Etude des règles de choix des agents

Une règle de choix, c'est ici une pondération des facteurs combinés, à l'échelle globale ou à l'échelle locale, pour un agent donné. Une pondération peut bien entendu être nulle.

3.2.1. Difficultés dans la recherche d'une règle de décision robuste par agent. Nous nous sommes attachés à déterminer au moins un compromis de pondérations des facteurs combinés dans les règles de choix, locale et globale, plutôt qu'à conduire une analyse de sensibilité complète des sorties du modèle aux facteurs. 43 125 simulations ont été exécutées, intégrant à chaque fois une combinaison unique entre pondérations des facteurs de choix global et celles des facteurs de choix local. Avant même d'entreprendre toute analyse de validité de ces simulations, nous avons cherché à distinguer les facteurs par leurs parts respectives d'explication de la variabilité des variables de sorties (Tab. 7). Pour ce faire, nous avons sommé l'ensemble des

facteurs agissant aux deux échelles, ainsi que les interactions d'ordre 1 (cf. équation [3]). L'élaboration des modèles linéaires d'ajustement des variables de sorties par les facteurs de choix nous a semblé être une voie rationnelle de sélection hiérarchisée des facteurs les uns par rapport aux autres, particulièrement dans cette phase exploratoire de comparaison de l'intérêt des facteurs (Ezanno and Lesnoff 2009, Lurette et al. 2009). Mais cette méthode nécessite de procéder par variables de sorties, d'une part, et par agent d'autre part.

Comme nous l'avons vu, les résultats de ces analyses sont délicats à interpréter. En effet, les coefficients de détermination ($R^2 < 0.40$) ainsi que les nombres élevés de degrés de liberté des modèles indiquent qu'une faible part de la variabilité des différentes variables simulées est expliquée par les facteurs de choix et leurs interactions. Nous nous attendions à cette difficulté d'analyse, vu que les sorties contiennent par nature une partie émergente. Toutefois, cette utilisation de combinaisons linéaires justifiait le recours à des modèles linéaires pour étudier la variabilité des sorties. Certains facteurs ressortent de façon majeure et systématique dans l'explication de la variabilité de chaque sortie pour chaque agent (cf. § 2.1.1.). Il s'agit du facteur local d'attraction aux aménagements, du facteur local de biomasse disponible, des deux facteurs locaux des qualités de la ressource, et du facteur global de moindre distance à parcourir. Ces cinq facteurs semblent donc particulièrement influencer sur les simulations, selon leur pondération. La forte représentation de facteurs locaux va dans le sens de ce que nous avons déjà observé (cf. (2), § 1.2.2.) : les circuits sont d'abord construits par les choix locaux. Cela ne signifie pas que la règle de décision à l'échelle globale des unités de végétation est inutile : le facteur global de moindre distance à parcourir l'illustre.

Cette analyse n'est pas assez fiable, statistiquement, pour permettre une hiérarchisation des facteurs, aux deux échelles. Nous avons de ce fait conservé la totalité des facteurs identifiés comme nécessaires (Tab. 4). Nous avons en effet montré qu'il était nécessaire, dans le chapitre 2, d'intégrer des facteurs liés à la végétation. Nous avons en outre pensé que si un facteur n'était pas utile, seul ou en interaction avec d'autres, il serait automatiquement éteint dans les simulations retenues par la procédure de validation. Et nous avons raison : le facteur local de moindre distance à parcourir est pondéré à 0 dans les combinaisons sélectionnées. C'est la preuve que ce facteur, localement, apparaît entravant à l'évolution des agents sur le territoire virtuel, au cours d'une journée de libre pâture.

3.2.2. Recherche d'une règle de décision robuste par agent. La procédure de validation élaborée a permis de sélectionner 627, 779 et 341 simulations, respectivement pour les agents 1, 2 et 3 (cf. § 2.1.). Les agents sont identiques à part la localisation de leur parc de nuit. Comme déjà précisé, les agents 1 et 3 sont dans des positions initiales extrêmes. En outre, les agents 1 et 2 sont dans des conditions initiales réalistes. Nous rappelons que le caractère de taille, grand ou petit, n'est pas un attribut des agents, mais une réalité des troupeaux, parqués plus ou moins loin du point d'eau selon leurs tailles. Le paramètre d'éloignement entre parc de nuit et point d'eau est susceptible d'influer sur le fait (1) que l'agent 2, en position intermédiaire, est celui qui a le plus de combinaisons pondérant les facteurs de choix validant les simulations, et (2) que l'agent 1, dans des conditions réalistes, a plus de combinaisons validantes que l'agent 3.

De ces 1 747 combinaisons validant leurs simulations, seules quatre étaient communes aux trois agents. Ces compromis potentiels semblaient être justifiés vu la validation du postulat 2 (compromis possible cf. § 2.1.2.) par la comparaison des trois tableaux de variables de sorties des simulations validées par agent. C'est l'utilité de la procédure *Statis* (Lavit et al. 1994) que d'indiquer la pertinence d'un compromis entre des tableaux, en calculant les corrélations entre agents et en hiérarchisant l'implication des facteurs responsables de la variabilité des variables de sorties, entre les tableaux.

Nous avons toutefois dû reconnaître que les compromis potentiels du Tableau 8 étaient biaisés comme nous avons invalidé le postulat 4 (faible utilité de répéter les simulations d'une combinaison donnée, cf. § 1.3.2.). Cette invalidation a résulté des répétitions des combinaisons testées, qui ont mis en évidence une instabilité des variables de sorties.

3.2.3. Analyse de la stabilité des sorties du modèle par le biais de la procédure de validation. La finalité de l'étude, devant lier les circuits quotidiens des troupeaux aux performances individuelles, requiert un niveau élevé de réalisme de la représentation. C'est pourquoi nous avons intégré le plus de critères possibles pour l'évaluation des simulations. L'apport des répétitions de certaines combinaisons sur l'instabilité des variables de sorties a nécessité de moduler notre approche de validation du modèle, en analysant rétroactivement l'effet de la suppression d'un critère de validation sur le « succès » d'une combinaison testée, en terme de taux de validation des simulations correspondantes. Nous avons mis en évidence que le critère de distance invalide trop fortement les circuits de l'agent 1. En outre, les critères d'activités sont particulièrement invalidants pour tous les agents, l'agent 3 y étant le plus sensible. Clairement, ces invalidations sont liées à l'écart important entre l'intervalle des variables simulées et l'intervalle des critères correspondant observés (Fig. 4 & Tab. 11). Vu le niveau d'agrégation et d'autres choix de modélisation, le modèle a tendance à surestimer systématiquement les distances parcourues pour l'agent 1, et à sous-estimer l'activité Pâturage-déplacement pour tous les agents. Donc, contrairement au critère de distance parcourue qui pose problème particulièrement pour l'agent 1, les variables d'activités simulées sont à améliorer globalement dans la représentation.

C'est pourquoi, sans corrélations statistiques faites, nous interprétons ces contraintes relatives à la validation des combinaisons des agents comme liées à l'éloignement entre parc de nuit et point d'eau. Dans le Tableau 12, toutes les combinaisons proposées pour l'agent 2, en position intermédiaire sur la carte virtuelle, confèrent un taux de validation d'au moins 80%, bien que la démarche de validation soit faite sur tous les critères. L'agent 1, intrinsèquement, se déplace de la même manière que l'agent 2, malgré un éloignement plus faible entre les aménagements. Certes, la proportion de l'activité Déplacement de l'agent 1 (36%), est moins élevée que celle de l'agent 2 (42%) sur l'ensemble des 6 400 simulations faites mais aussi sur les simulations validées: 11% pour l'agent 1 contre 15% pour l'agent 2. Cette activité émerge directement des cellules localement traversées, à chaque pas de temps. Pour l'illustrer, nous rappelons que lorsqu'un agent choisit dans un rayon de 10 cellules autour de lui, il est en activité Pâturage-déplacement s'il parcourt jusqu'à deux cellules en un pas de temps. Il est en activité Déplacement sinon. Il faudrait que l'agent 1 soit davantage « freiné », afin de conserver les heures satisfaisantes de passage aux aménagements, mais de corriger les distances parcourues.

3.2.4. Conclusion sur la recherche d'un compromis. Si on examine maintenant l'agent 3 avec le même paramétrage (Tab. 11), à partir des 6 400 simulations faites, l'activité Déplacement représente 52% du temps de parcours, en moyenne. Localement, cet agent est activé pour se rapprocher du prochain aménagement, ce qui explique que la proportion des déplacements soit plus forte. Même s'il y a bien un effet de la taille du troupeau sur les proportions d'activités de pâturage-déplacement et de déplacement seul (cf. chapitre 2, § 2.3. : augmentations des déplacements avec la taille du troupeau, $P = 0,07$), il est encore plus difficile de valider les circuits de l'agent 3 vu ces critères d'activités (trop de déplacements seuls). Ces différences de proportions d'activités entre agents confortent notre stratégie de ne pas tester exhaustivement toutes les combinaisons possibles. En effet, l'apport de l'étude de calibrage réside surtout dans la compréhension des phénomènes qui contraignent la recherche d'un compromis entre agent. De même, nous pensons que la maille de discrétisation des valeurs des pondérations, fixée à 0,25, n'a de ce fait pas de conséquence sur la compréhension. Il semble judicieux de moduler les différences entre agents, liées à l'éloignement entre les aménagements, plutôt que de continuer à tester de nouvelles combinaisons de facteurs. C'est-à-dire que nous pensons que nous avons déjà déterminé des combinaisons potentiellement robustes, mais qu'elles ne le deviendront qu'une fois une contrainte d'ajustement appliquée selon l'éloignement entre parc et point d'eau.

Il n'est toutefois pas simple de moduler l'effet de cet éloignement sur les variables de sorties, afin de déterminer un nouveau compromis stable de calibrage. La stabilité d'une combinaison est sensible au caractère stochastique d'un seul des facteurs : la marche en avant. Mais c'est une réalité que les troupeaux évoluent dans un cône de $\pm 45^\circ$, de proche en proche. Ne pas l'avoir intégré dans le facteur de marche en avant aurait représenté un manque de réalisme et

un manque d'abstraction pour travailler sur n'importe quel troupeau du territoire d'étude. C'est pourquoi nous n'avons pas bloqué ce facteur sur une valeur angulaire fixe.

Dans notre approche troupeau-centrée, nous avons donc montré qu'il était possible d'avancer sur l'association entre performances des animaux et circuits quotidiens des troupeaux. Cette phase troupeau-centrée s'achève sur le constat qu'il est difficile de déterminer un calibrage unique et stabilisant, eu égard aux variables de sorties, des règles de choix spatialisés d'agents équivalents mais positionnés plus ou moins loin du point d'eau. Il s'agit sans doute à présent de complexifier la représentation des agents, en intégrant une diversité autre que la position initiale : la taille du troupeau, voir les individus bovins en tant que tel. Les individus, par une interférence liée à la socialité (Moody and Houston 1995, Seth 2000, 2001), peuvent influencer sur la règle de choix locale des agents Individus et donc présenter un intérêt dans la recherche d'ajustement des distances parcourues. C'est, quoi qu'il en soit, une obligation dans le processus d'étude devant aboutir aux performances individuelles des animaux.

3.3. Maîtrise des processus d'ingestion

La décomposition des agents Troupeaux est également d'intérêt dans la distribution de l'ingestion parmi les bovins. Mais cela n'a pas été fait car l'entité Troupeau est au départ une échelle d'agrégation suffisante pour tester différents scénarii de calibrage des processus d'ingestion. Nous avons comparé trois méthodes cumulatives d'ingestion (cf. § 2.3.). La méthode « MM » utilise nos résultats des ajustements des vitesses d'ingestion (VI) instantanées par les biomasses (Bm) disponibles (cf. chapitre 1), selon les types de couverts, par un formalisme d'analogie aux cinétiques de Michaëlis et Menten. Cette méthode entraîne une large surestimation des quantités ingérées (QI) quotidiennes (Fig. 6). En effet, les VI instantanées sont une représentation à très court terme du processus d'ingestion, largement variable sur la journée, du fait d'ajustements de la motivation à ingérer des ruminants, outre l'alternance de phases alimentaires et non-alimentaires (Gibb et al. 1998, Boval et al. 2007). L'utilisation de cette méthode demande sans doute une plus grande finesse de la représentation du comportement spatial et alimentaire des bovins. Cela doit passer par une meilleure description des interactions des individus bovins entre eux (i.e. comportement social) et avec la ressource fourragère (i.e. par la définition de préférences moins stéréotypées). L'activité d'ingestion en marchant s'avère trop simpliste et ce comportement mixte n'a sans doute pas suffisamment été bien décrit. La ressource doit elle aussi être sans doute décrite plus finement. Par exemple, nous n'avons pas retenu l'encombrement des fourrages comme variable de qualité à laquelle les agents réagissent. Cela était justifié du fait d'un manque d'informations sur cette donnée. En effet, s'il existe des valeurs d'encombrement pour des couverts monospécifiques (INRA 1989), il n'était pas aisé de les connaître pour les couverts mixtes. Mais finalement, nous sommes en accord avec Dumont et Hill (2004), qui suggèrent qu'il est essentiel de rechercher du réalisme, y compris au niveau de l'individu, si on veut parvenir à respecter les principes biologiques sous-jacents. Malheureusement, même si c'est une condition nécessaire pour des objectifs zootechnique encore faut-il y parvenir par complexifications successives.

Toutefois, d'un point de vue opérationnel, les modèles sophistiqués alliant écologie, éthologie et intelligence artificielle, peuvent être délicat à valider, du fait d'imprécisions dans l'implémentation ou de manques de données d'observation (Dumont and Hill 2001). C'est pourquoi la méthode « régulière » était intéressante. Il s'agit de fixer une VI constante par pas de temps, calibrée à partir des QI observées. Comme nous l'avons déjà dit, c'est la méthode qui donne les résultats les plus satisfaisants. Mais elle va à l'encontre de la théorie de la Réponse fonctionnelle (Ungar 1996, van Langevelde et al. 2008). Plus le modèle a de processus stéréotypés, moins il est « autonome ». En effet, cette méthode demande moins d'efforts (i.e. une actualisation de la QI de référence selon la saison et le territoire), à condition d'avoir les données pour. Alors qu'un effort d'ajustement des VI fixées par les modèles Michaëlis-Menten peut permettre une émergence plus générique des QI au cours des saisons. C'est cette voie que nous défendons. Quant à la méthode intermédiaire, utilisant les modèles Michaëlis-Menten avec un forçage par 3, cela revient à proposer une solution simple à l'interprétation d'une activité

complexe qu'est le pâturage-déplacement. Si nous avons mesuré ces VI *in situ* (cf. chapitre 1), nous n'avons pas pu contrôler tous les animaux simultanément ni même uniquement un seul animal au cours d'une même journée. Une des propriétés émergentes de notre modèle, qu'il faudrait tester sur le terrain, est qu'un individu n'ingère avec la VI déterminée qu'un tiers de son temps de pâturage déplacement.

CONCLUSION

Nous avons développé un modèle original de représentation du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours. Dans un cadre de recherche-action, visant à lier les circuits quotidiens des troupeaux aux performances individuelles des bovins, nous avons procédé par étapes. Notre approche est restée troupeau-centrée tout au long de cette étude. Il convenait, par parcimonie, de maintenir des niveaux d'agrégations suffisants tant que la complexification n'était pas nécessaire. Il est reconnu que plus le niveau de détails implémentés est élevé, plus la quantité de données d'observation doit être grande, et plus il est compliqué de procéder à l'évaluation du modèle (Mechoud et al. 1998, Parsons and Dumont 2003). Trois entités Troupeaux équivalents, dénommés agents, ont été positionnés dans un environnement, issu du territoire observé, dénommé parcours. C'est à la fois un stock de ressources végétales discrétisées et des aménagements (parc de nuit, point d'eau). L'objet de l'étude était de calibrer les règles de choix spatialisés des agents, réagissant à des facteurs abiotiques (aménagements), et biotiques (ressources fourragères). Si nombre de réglages (combinaisons de pondération) ont permis d'obtenir des simulations satisfaisantes, peu assurent la stabilité des trajectoires des agents. Et aucune de ces dernières n'est robuste entre les agents. Nous avons mis en évidence que l'on peut s'approcher d'un réglage unique pour tous les agents, mais que malgré leur équivalence, la position initiale du troupeau sur le terroir est une contrainte majeure qui doit influencer sur ce réglage. Nous suggérons qu'il faut développer d'autres processus biologiques qui, par un lien indirect avec la règle de choix unique, pourra la moduler selon la position initiale des agents. Cela passe par la décomposition du troupeau en individus qui interagissent, pour moduler les activités alimentaires et/ou les distances parcourues. Pour les activités de pâturage-déplacement, notre modèle suggère de tester sur le terrain que les vitesses d'ingestions moyennes ne représentent qu'un tiers environ du temps à ingérer. Pour les distances parcourues, nous savons que suite aux analyses des circuits (cf. chapitre 2), la prévision des distances parcourues quotidiennement n'était en relation directe ni avec les durées des activités ni avec les temps de passage aux points fixes. Les distances parcourues sont d'abord induites par l'orientation de l'éleveur. La finalité de ce modèle est de disposer d'un outil réaliste et précis permettant de tester l'impact de modifications de l'environnement (positions des aménagements, par exemple) sur l'évolution des circuits et les distances parcourues, sur les consommations alimentaires et, à plus long terme, sur les performances animales dans ces milieux complexes.

REMERCIEMENTS

Nous associons B. Bonté (CIRAD), modélisateur en épidémiologie, à ce travail. Il a su stimuler et vérifier chaque étape de la construction du modèle. Nous tenons à remercier sincèrement S. Messad (CIRAD) et A. Lurette (INRA) pour l'appui sur les méthodes statistiques mises en œuvre. Nous remercions également F. Colin (Montpellier SupAgro) pour l'accès aux ressources informatiques. Nous remercions enfin Lia Della Rossa (INRA) pour son appui dans l'organisation des simulations.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdalla, M. Y., and A. S. Elsheikh. 2008. Postpartum interval of Darfurian cows: Influences of breed, BCS, parity and season. *African Journal of Agricultural Research* 3:499-504.
- Agreil, C., M. Meuret, and H. Fritz. 2006. Adjustment of feeding choices and intake by a ruminant foraging in varied and variable environments: new insights from continuous bite monitoring. In: V. Bels [ed.]. *Feeding in domestic vertebrates: from structure to behaviour*. CAB International. p. 302-325.
- Akinbamijo, O. O., S. Nouala, F. B. Sanyang, and O. B. Smith. 2003. Utilisation of horticultural residues by N'Dama cattle and their crosses in The Gambia. *Livestock Production Science* 80:221-228.
- Ayantunde, A. A., S. Fernandez-Rivera, P. Hiernaux, H. van Keulen, H. M. J. Udo, and M. Chanono. 2001. Effects of timing and duration of grazing of growing cattle in the West African Sahel on diet selection, faecal output, eating time, forage intake and live-weight changes. *Animal Science* 72:117-128.
- Ba Diao, M., A. Dieng, M. M. Seck, and R. C. Ngomibé. 2006. Pratiques alimentaires et productivité des femelles laitières en zone périurbaine de Dakar. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* 59:43-49.
- Bah, A., I. Toure, C. Le Page, A. Ickowicz, and A. T. Diop. 2006. An agent-based model to understand the multiple uses of land and resources around drillings in Sahel. *Mathematical and Computer Modelling* 44:513-534.
- Bailey, D. W., J. E. Gross, E. A. Laca, L. R. Rittenhouse, M. B. Coughenour, D. M. Swift, and P. L. Sims. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management* 49:386-400.
- Beecham, J. A., and K. D. Farnsworth. 1998. Animal foraging from an individual perspective: an object orientated model. *Ecological Modelling* 113:141-156.
- Bousquet, F., H. Bakam, H. Proton, and C. Le Page. 1998. Cormas : Common-pool resources and multi-agents systems. In: International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Castellon (Spain). p. 826-837.
- Bousquet, F., and C. Le Page. 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling* 176:313-332.
- Boval, M., A. Fanchone, H. Archimede, and M. J. Gibb. 2007. Effect of structure of a tropical pasture on ingestive behaviour, digestibility of diet and daily intake by grazing cattle. *Grass and Forage Science* 62:44-54.
- Burnham, K. P., and D. R. Anderson. 2002. Model selection and multimodel inference. A practical information-theoretic approach. Springer Science [ed.], New York, USA.
- Cambier, C., A. Ickowicz, M. Maury, and R. J. Manlay. 2005. Modèle de comportement spatial de troupeaux de bovins pour la gestion d'un terroir. In: Joint Conference on Multi-Agent Modelling for Environmental Management, Bourg St Maurice – Les Arcs, France.
- Chirat, G., A. Ickowicz, S. Messad, and F. Bocquier. submitted-a. Feed intake of free ranging cattle on tropical semi-arid territories through instantaneous and daily measurements. *Rangeland Ecology & Management*.
- Chirat, G., A. Ickowicz, S. Messad, and F. Bocquier. submitted-b. Modeling Free-Ranging Cattle Spatial Behavior in Sahel: Daily Circuits Description, Conceptualization and Validations. *Rangeland Ecology & Management*.
- Coquelle, L., C. Buche, and P. Chevaillier. 2004. Un langage à base de logique floue pour la simulation de comportements individuels d'animaux. In: Cépades [ed.]. Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA'04). p. 379-386.
- D'Aquino, P., C. Le Page, F. Bousquet, and A. Bah. 2003. Using self-designed role-playing games and a multi-agent system to empower a local decision-making process for land use management: the selfCormas experiment in Senegal. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6.
- Davies, M. 1989. Connectionism, Modularity, and Tacit Knowledge. *The British Journal for the Philosophy of Science* 40:541-555.

- de Ridder, N., and H. Breman. 1991. A New Approach to Evaluating Rangeland Productivity in Sahelian Countries. *In: R. H. Behnke, I. Scoones, and C. Kerven [eds]. Range Ecology at Disequilibrium. New Models of Natural Variability and Pastoral Adaptation in African Savannas.* ODI Publications, London. p. 104-117.
- Decruyenaere, V., P. Lecomte, C. Demarquilly, J. Aufrere, P. Dardenne, D. Stilmant, and A. Buldgen. 2009. Evaluation of green forage intake and digestibility in ruminants using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): Developing a global calibration. *Animal Feed Science and Technology* 148:138-156.
- Dedieu, B., F. Louault, H. Tournadre, and M. Benoit. 2008. Réponse de systèmes d'élevage innovants à la variabilité climatique: une expérimentation en production extensive ovin viande intégrant des préoccupations environnementales. *In: B. Dedieu, E. Chia, B. Leclerc, C.-H. Moulin, and M. Tichit [eds]. L'élevage en mouvement: Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores.* Quae, Paris, France. p. 161-178.
- Dumont, B., and A. Boissy. 1999. Relations sociales et comportement alimentaire au pâturage. *INRA Productions Animales* 12:3-10.
- Dumont, B., and D. R. C. Hill. 2001. Multi-agent simulation of group foraging in sheep: effects of spatial memory, conspecific attraction and plot size. *Ecological Modelling* 141:201-215.
- Dumont, B., and D. R. C. Hill. 2004. Spatially explicit models of group foraging by herbivores: what can Agent-Based Models offer? *Animal Research* 53:419-428.
- Durrett, R., and S. Levin. 1994. The importance of being discrete (and spatial). *Theoretical Population Biology* 46:363-394.
- Ezanno, P., I. A., and B. Faye. 2002. Demographic parameters of N'Dama cattle raised under extensive range management conditions in southern Senegal. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* 55:211-219.
- Ezanno, P., A. Ickowicz, and R. Lancelot. 2005. Relationships between N'Dama cow body condition score and production performance under an extensive range management system in Southern Senegal: calf weight gain, milk production, probability of pregnancy, and juvenile mortality. *Livestock Production Science* 92:291-306.
- Ezanno, P., and M. Lesnoff. 2009. A metapopulation model for the spread and persistence of contagious bovine pleuropneumonia (CBPP) in Africa sedentary mixed crop-livestock systems. *Journal of Theoretical Biology* 256:493-503.
- Fanchone, A., M. Boval, P. Lecomte, and H. Archimède. 2007. Faecal indices based on near infrared spectroscopy to assess intake, in vivo digestibility and chemical composition of the herbage ingested by sheep (crude protein, fibres and lignin content). *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 15:107-113.
- FAO. 1995. Approche participative, communication et gestion des ressources forestières en Afrique sahéenne: Bilan et perspectives, Rome, Italia. Disponible sur <http://www.fao.org/docrep/v9974f/v9974f00.HTM> . Consulté le 28 novembre 2009.
- Ferber, J. 1995. Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective. InterEditions [ed], Paris, France.
- Ganskopp, D. 2001. Manipulating cattle distribution with salt and water in large arid-land pastures: a GPS/GIS assessment. *Applied Animal Behaviour Science* 73:251-262.
- Garnsworthy, P. C., and Y. Unal. 2004. Estimation of dry-matter intake and digestibility in group-fed dairy cows using near infrared reflectance spectroscopy. *Animal Science* 79:327-334.
- Gibb, M. J., C. A. Huckle, and R. Nuthall. 1998. Effect of time of day on grazing behaviour by lactating dairy cows. *Grass and Forage Science* 53:41-46.
- Gross, J. E., C. Zank, N. T. Hobbs, and D. E. Spalinger. 1995. Movement rules for herbivores in spatially heterogeneous environments: responses to small scale pattern. *Landscape Ecology* 10:209-217.
- Guerin, H. 1999. Valeur alimentaire des fourrages cultivés. *In: G. Roberge and B. Toutain [eds]. Cultures fourragères tropicales.* CIRAD. p. 93-145.
- Guérin, H., D. Richard, D. Friot, and N. Mbaye. 1986. Les choix alimentaires des bovins et ovins sur pâturages sahéens. *Reproduction Nutrition Development* 26:269-270.
- Hoch, S. 2004. Wharton on Making Decisions. Wiley, New York, USA.

- Ickowicz, A., and M. Mbaye. 2001. Forêts soudaniennes et alimentation des bovins au Sénégal : potentiel et limites. *Bois et forêts des tropiques* 270:47-61.
- INRA. 1989. Ruminant nutrition. Recommended allowances and feed tables. R. Jarrige [ed]. INRA and John Libbey Eurotext Paris, France, London, England.
- ISRA. 2003. Rapport national sur l'état des ressources zoogénétiques au Sénégal. Dakar, Sénégal.
- Knopf, L., O. C. Komoin, B. Betschart, B. Gottstein, and J. Zinsstag. 2004. Production and health parameters of N'Dama village cattle in relation to parasitism in the guinea savannah of Côte d'Ivoire. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* 57:95-100.
- Kolasa, J., and C. D. Rollo. 1991. Introduction: the heterogeneity of heterogeneity: a glossary. In: J. Kolasa and S. T. A. Picket [eds]. *Ecological Heterogeneity*. Springer-Verlag, New York, USA. p. 1-23.
- Lavit, C., Y. Escoufier, R. Sabatier, and P. Traissac. 1994. The ACT (Statis method). *Computational Statistics and Data Analysis* 18:97-119.
- Le Moigne, J.-L. 1977. La théorie du système général, théorie de la modélisation. Presses Universitaires de France [ed], Paris, France.
- Lecomte, P., F. Safietou, D. Friot, D. Richard, A. Ickowicz, H. Guérin, and L. Bonnal. 2003. Calibrating in vivo feeding value parameters on faeces NIRs spectral data's. Case of rations fed to tropical ruminants (Senegal). In: Institut de l'élevage and INRA [eds]. *Rencontres Recherches Ruminants*, Paris, France. p. 171.
- Lurette, A., S. Touzeau, M. Lamboni, and H. Monod. 2009. Identifying key-parameters influencing Salmonella prevalence in a pig batch model: a sensitivity analysis on dynamical outputs. *Journal of Theoretical Biology* 258:43-52.
- Manlay, R. J., A. Ickowicz, D. Masse, C. Feller, and D. Richard. 2004a. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna--II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural Systems* 79:83-107.
- Manlay, R. J., A. Ickowicz, D. Masse, C. Floret, D. Richard, and C. Feller. 2004b. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna--I. Element pools and structure of a mixed-farming system. *Agricultural Systems* 79:55-81.
- Masse, D., R. J. Manlay, M. Diatta, R. Pontanier, and J. L. Chotte. 2004. Soil properties and plant production after short-term fallows in Senegal. *Soil Use and Management* 20:92-95.
- Mechoud, S., D. R. C. Hill, A. Campos, D. Orth, Y. Michelin, C. Poix, G. L'Homme, P. Carrere, M. Lafarge, P. Loiseau, D. Micol, M. Brun, F. Dubuc, B. Dumont, M. Petit, P. Coquillard, J. Geugnot, and M. Teuma. 1998. Simulation Multi-Agents de l'entretien du paysage par des herbivores en moyenne montagne. In: Cemagref [ed]. *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires*. Clermont-Ferrand, France.
- Moody, A. L., and A. I. Houston. 1995. Interference and the ideal free distribution. *Animal Behaviour* 49:1065-1072.
- Mueller, T., and W. F. Fagan. 2008. Search and navigation in dynamic environments - from individual behaviors to population distributions. *Oikos* 117:654-664.
- Parsons, A. J., and B. Dumont. 2003. Spatial heterogeneity and grazing processes. *Animal Research* 52:161-179.
- Pyke, G. H. 1984. Optimal Foraging Theory: A Critical Review. *Annual Review of Ecology and Systematics* 15:523-575.
- Ramseyer, A., B. Thierry, A. Boissy, and B. Dumont. 2009. Decision-making processes in group departures of cattle. *Ethology* 115:948-957.
- Reynolds, C. W. 1987. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. In: *Computer Graphics (SIGGRAPH '87 Conference Proceedings)*. p. 25-34.
- Rivière, R. 1991. Alimentation des ruminants domestiques en milieu tropical. La Documentation Française [ed].
- Rodriguez, L. 2008. Une perspective mondiale sur la valeur économique totale du pastoralisme : Un rapport de synthèse global basé sur six évaluations pays. IMPD - GEF - PNUD - IUCN, Nairobi, Kenya.
- Sere, C., H. Steinfeld, and J. Groenewold. 1995. World livestock production systems. FAO Animal Production And Health Paper, LEAD, Rome.

- Seth, A. K. 2000. Unorthodox optimal foraging theory. *In: J. Meyer, A. Berthoz, D. Floreano, H. Roitblat, J.-D. Nicoud, and F. Mondada [eds]. From animals to animats 6: Proceedings of the Sixth International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior.* MIT Press, Cambridge, UK. p. 478-481.
- Seth, A. K. 2001. Modelling group foraging: Individual suboptimality, interference, and a kind of matching. *Adaptive Behavior* 9:67-91.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. Livestock's long shadow, environmental issues and option. FAO, LEAD Initiative, Rome.
- Thioulouse, J., and D. Chessel. 1987. Les analyses multitableaux en écologie factorielle. I: De la typologie d'état à la typologie de fonctionnement par l'analyse triadique. *Acta oecologica* 8:463-480.
- Ungar, E. D. 1996. Ingestive Behaviour. *In: J. Hodgson and A. W. Illius [eds]. The Ecology and Management of Grazing Systems.* CAB International, Wallingford, UK. p. 185-218.
- van Langevelde, F., M. Drescher, I. M. A. Heitkonig, and H. H. T. Prins. 2008. Instantaneous intake rate of herbivores as function of forage quality and mass: effects on facilitative and competitive interactions. *Ecological Modelling* 213:273-284.
- Walliser, B. 1977. Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes. Editions du Seuil [eds], Paris, France.
- Watts, J. M. 1998. Animats: Computer-simulated animals in behavioral research. *Journal of Animal Science* 76:2596-2604.

DISCUSSION GENERALE :

Représenter de façon intégrative le comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours agropastoral tropical

Comment peut-on évaluer l'optimalité des circuits des troupeaux bovins en libre pâture, en termes de développement durable, à travers l'impact sur les ressources, les performances individuelles et les pratiques d'éleveur ? Par la modélisation, il semble possible de lier les circuits quotidiens des troupeaux, déterminés à la fois par les ressources fourragères, les aménagements abiotiques mais aussi les pratiques des éleveurs, aux performances animales. Ainsi, en modifiant l'environnement d'agents bovins, comme la position d'aménagements, nous pourrions estimer les différents bilans entre apports et besoins des animaux selon les circuits tout en tenant compte des répercussions sur les ressources et les pratiques. Afin d'avancer sur cette thématique zootechnique, l'objectif immédiat de cette thèse est de représenter de façon intégrative les comportements spatiaux et alimentaires de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours agropastoral tropical.

1. CONTEXTE DE LA RECHERCHE

Vulnérabilité des familles agropastorales, ainsi que risques environnementaux et besoins mondiaux croissants en produits animaux redessinent des enjeux de développement durable des systèmes agropastoraux. Les régions sub-humides à semi-arides, comme celles d'Afrique sahélo-soudanienne, connaîtront sans doute la mise en oeuvre d'une lutte contre les dégradations des milieux et l'augmentation des productivités des ruminants domestiques. En effet, ces zones agropastorales sont particulièrement concernées par la problématique d'intensification écologique (Sere et al. 1995, Steinfeld et al. 2006). Comme nous l'avons déjà défini dans l'introduction générale (cf. introduction générale, § 1.1.1.), les systèmes agropastoraux et pastoraux en zone tropicale sèche se situent dans les zones agroécologiques arides, semi-aride et sub-humide. Les systèmes agropastoraux sont mixtes, entre élevage bovin et cultures, généralement pluviales, vivrières (petit mil, sorgho, arachide, maïs, riz) ou de rente (arachide, coton). Les systèmes pastoraux n'englobent que des activités d'élevage, exploitant les ressources fourragères spontanées des parcours. Tous ces systèmes sont fréquemment divaguant. Les déjections animales y sont une source de fertilisation des cultures pluviales. Malgré des accès relatifs aux engrais minéraux, cet amendement endogène n'est pas négligeable (Manlay et al. 2004). Les paysages sub-humides sont plus hétérogènes que les zones semi-arides. Les terres agropastorales sont une mosaïque de forêt, de savanes, de jachères plus ou moins anciennes, et de parcelles cultivées. Contrairement aux zones agroécologiques tempérées, les animaux y prélèvent directement le stock de résidus de cultures dans les champs. Si les pratiques diffèrent fortement, la comparaison des zones tropicales sèches et des zones tempérées est également limitée par les caractéristiques des ressources fourragères. Les espèces diffèrent (plutôt vivaces en zones tempérées, annuelles en zones semi-arides), les surfaces herbagères tempérées sont majoritairement des prairies, dont les biomasses se renouvellent à un certain seuil de degrés-jours (Topping et al. 2003, Jouven 2006), contrairement aux ressources herbacées de nos zones d'étude, où le stock d'annuelles est globalement invariant et sec à partir du début de la saison sèche.

Nous avons choisi d'aborder cette problématique par cette interrogation : est-il possible de décrire puis de prédire, au cours de la saison sèche, les prélèvements alimentaires effectués par les bovins en libre pâture sur parcours ? Nous nous sommes concentrés sur l'observation du comportement spatial et alimentaire des troupeaux, afin de reconstruire avec parcimonie les interactions entre troupeaux bovins et parcours.

L'analyse du triptyque « Homme – Animal – Ressource » (Landais 1987) est une approche classique qui s'applique également aux systèmes agropastoraux. Nous n'avons pas cherché à étudier ce triptyque qui, s'il convient bien à l'échelle limitée d'une exploitation, devient extrêmement complexe à mettre en oeuvre dans le contexte plus englobant d'un territoire. Le pilier « Homme » nécessite une approche globale socio-économique et politique, via l'identification d'objectifs, des régulations, des incitations, des politiques agricoles (Lalba et al. 2005). Mais ne s'intéresser qu'à la relation entre bovins et parcours ne signifie en aucun cas que nous excluons l'Homme du milieu. Les systèmes d'alertes précoces (cf. introduction générale, § 1.2.2.) s'intéressent bien aux piliers « Animal » et « Ressources » mais sont au service du pilier

« Homme ». La synthèse de variables environnementales à valeurs seuils (Rietkerk et al., 1996; Westoby et al., 1989) et la compréhension des effets conjoints influant sur les territoires et les productions animales est un des défis de la recherche, au même titre que la recherche globale de solutions socio-économiques.

En outre « l'Homme » influe nécessairement sur son troupeau par ses pratiques à court terme : aménagements utilisés, attache, heures de traite, entre autres. Modéliser le comportement spatial et alimentaire des troupeaux bovins en libre pâture est une voie de recherche-action qui intègre trois nœuds complémentaires d'un triptyque d'analyses. (1) La représentation du système d'animaux consommant les ressources fourragères agropastorales a nécessité de décrire leurs processus d'ingestion et, plus globalement, les séquences de végétation exploitées. (2) Cette étude d'un système divaguant a également requis la description des circuits quotidiens des troupeaux. Pour chacun de ces deux points, nous avons analysé les corrélations entre variables d'intérêt, afin d'améliorer les connaissances sur ce type de système d'élevage en zones sèches, et de nous permettre de représenter les choix alimentaires spatialisés et l'ingestion. (3) Cette procédure récursive nous a donné les moyens d'implémenter des fonctions motrices du modèle, de calibrer des paramètres d'entrée, et d'analyser la pertinence et les limites de cette reconstruction, en vue d'une utilisation à court terme.

L'évaluation de notre approche orientée agents, intégrant des entités Troupeaux et Parcours et une heuristique de choix alimentaires spatialisés, ouvre des perspectives de recherche. Cette démarche a l'ambition d'aborder l'environnement biotique et abiotique des bovins, leurs performances et les pratiques d'élevage. Nous revenons d'abord sur les intérêts et limites des études de terrain menées. Nous dressons ensuite un bilan sur la méthodologie développée au cours de cette thèse, en montrant que notre approche est transposable à d'autres zones d'élevage sur parcours.

2. INTEGRATION DU COMPORTEMENT SPATIAL ET ALIMENTAIRE

L'intégration du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours agropastoral tropical englobe trois modules complémentaires de représentation des processus. Il y a d'une part l'observation du comportement alimentaire, centré sur les processus d'ingestion, liés aux facteurs de l'environnement et aux facteurs animaux. D'autre part, l'étude du comportement spatial permet, à l'échelle du troupeau et du territoire, de comprendre quels facteurs déterminent les choix d'orientation des animaux. Parmi ces facteurs, il s'agit de proposer quels éléments du parcours, biotiques comme abiotiques, polarisent les animaux, selon des facteurs de pratiques des éleveurs, et des facteurs propres aux animaux. Enfin, la représentation par la modélisation permet d'intégrer les observations sur les circuits et sur l'ingestion et d'avancer vers la prédiction de productions animales dans ces milieux peu contrôlés, par une procédure récursive de vérification des étapes successives du modèle. A chaque étape, l'analyse des fonctions du modèle permet de déterminer les observations nécessaires et suffisantes à conduire, afin d'obtenir des simulations réalistes, tout en gardant un certain niveau d'abstraction, au service de la généralité du modèle. Réalisme et généralité sont garants de la portabilité du simulateur.

2.1. Intégration des processus d'ingestion : enjeux de réalisme et de portabilité du modèle

Nous avons imaginé, à la fin du chapitre 1 (partie analytique) et dans le chapitre 3 (partie intégrative), de forcer les vitesses d'ingestion (VI) à une valeur constante à l'échelle du pas de temps induisant une répartition régulière des quantités ingérées (QI) au cours de la journée. Cette méthode apparaît toutefois très limitant puisqu'elle augmente la spécificité du modèle à un cas de figure de pâturage homogène, alors qu'il est préférable de lier le processus d'ingestion aux particularités du parcours par essence variable et aux facteurs animaux. En ce sens, nous avons montré qu'il existe une voie transportable de représentation de l'ingestion : c'est la Réponse fonctionnelle (Ungar 1996, van Langevelde et al. 2008).

Notre analyse des données permet de lier VI et disponibilité de la biomasse (principalement) dans un modèle asymptotique. Nos observations sur des vaches stables, apparemment motivées à ingérer, sont en accord avec cette théorie. L'ajustement par un modèle Michaëlis-Menten est interprétable biologiquement : la valeur à l'asymptote est maximale (VI_{max}), et le coefficient K est un seuil de biomasse (B_m) pour lequel la VI_{max} est réduite de moitié. Les trois points que nous avons discutés, dans le chapitre 1 ont été : (1) que les valeurs observées sont élevées comparativement à des bovins de grand format dans des milieux *a priori* plus favorables (tempérés) ; (2) que les valeurs des VI sont très variables autour de la courbe moyenne d'ajustement aux biomasses et aux types de couverts ; (3) que les variations inter saison pour un couvert donné (à Kolda, territoire agropastoral sahélo-soudanien, comme à Dahra, territoire pastoral sahélien) ne sont pas expliquées par nos analyses.

(1) Sur les valeurs de VI, Peyraud et Delaby (2005) ont indiqué des VI variant entre 20 et 50 g MS/min environ, pour des bovins de 600 kg sur prairies tempérées. Or l'asymptote maximale de la courbe moyenne estimée des VI sur pailles spontanées est de 58 g MS/min. Or, le poids vif (PV) moyen des N'Dama est de l'ordre de 200 kg. Cela met en avant le fait que les N'Dama sont habitués aux contraintes que représentent des ressources grossières et hétérogènes sur terroir agropastoral sahélo-soudanien. De même que les zébus Gobra, de 250 à 400 kg PV sont adaptés au parcours pastoral sahélien. L'asymptote de leurs VI sur la courbe moyenne des pailles est de 30 g MS/min. Ces valeurs montrent que les VI ne peuvent pas être prédites par une simple relation allométrique générique avec le format des bovins. Entre zébus Gobra au nord sahélien, et taurins N'Dama au sud sahélo-soudanien, le temps de pâturage explique plus simplement les différences de VI. Les N'Dama sont attachés au moins 12 h par jour, alors que les Gobra jouissent d'un pâturage nocturne. Le type de système d'élevage et les pratiques associées doivent donc être considérées pour déterminer et apprécier ces valeurs

(2) La variabilité des VI, suite aux ajustements, dépend de facteurs pour part lié à l'animal. Même si nous avons dit qu'il n'y a pas de relations allométriques simples, le format exerce un effet positif sur les VI des N'Dama quelle que soit la saison ($P < 0,05$). Cette variable contribue donc à une part d'explication de la variabilité des VI. Il y a des effets de la biomasse, de sa dispersion (qui n'est sans doute pas complètement expliquées par le modèle asymptotique) et de la structure intrinsèque des couverts (i.e. hétérogénéité, préhensibilité, etc.). En outre, Gibb et al. (1998) rapporte des VI différentes pour un même animal sur un même couvert, à différents instants d'observation. Ce constat est le fait de deux éléments éthologiques difficiles à maîtriser. Il y a un effet de la socialité (Provenza and Balph 1988) : un individu s'alimentant sur un patch prête attention au moins à son plus proche congénère, ce qui doit influencer sur les VI. Il y a un effet de la motivation à ingérer également. La motivation peut être liée dans une certaine mesure à l'état corporel ou au stade physiologique de l'animal (Ezanno et al. 2005). La motivation est surtout liée à la qualité relative des différents couverts perçue par l'animal. Un animal est peu motivé à ingérer un couvert de pauvre qualité. Mais il est rapporté que cette perception peut évoluer, même au sein d'une journée (Gordon 2000). Selon la motivation à ingérer, les animaux sont plus ou moins stables lors d'activités de pâturage. Les conditions de mesure sur des animaux qui pâturent en marchant sont un autre facteur d'explication de la variabilité observée des VI (aspect méthodologique). L'ajustement des VI aux biomasses disponibles selon les couverts ne résume donc pas toutes les autres sources de variations liées aux animaux et aux ressources.

(3) Parmi les facteurs de variation des VI, l'effet saison a aussi été mis en évidence, à Kolda ($P < 0,01$) comme à Dahra ($P < 0,001$). Comme nous l'avons illustré dans la conclusion partielle du chapitre 1, il semble que ces différences soient dues à un effet conjoint de disponibilité de la ressource fourragère avec la préhensibilité des couverts. Plus la ressource est dispersée ou rase, plus l'ingestion est lente. Et la préhensibilité joue un rôle central dans la détermination des VI, pendant une courte phase d'ingestion (Ginnett et al. 1999, Benvenuti et al. 2008, Benvenuti et al. 2009). L'effet saison sur certains couverts bien décrits, comme la rizière, met en évidence que le piétinement des troupeaux induit une forte évolution de la préhensibilité et élève de ce fait les VI. Nous proposons, Figure 1, une illustration de ces différents facteurs liés à l'environnement et aux animaux qui influent sur la variabilité des VI.

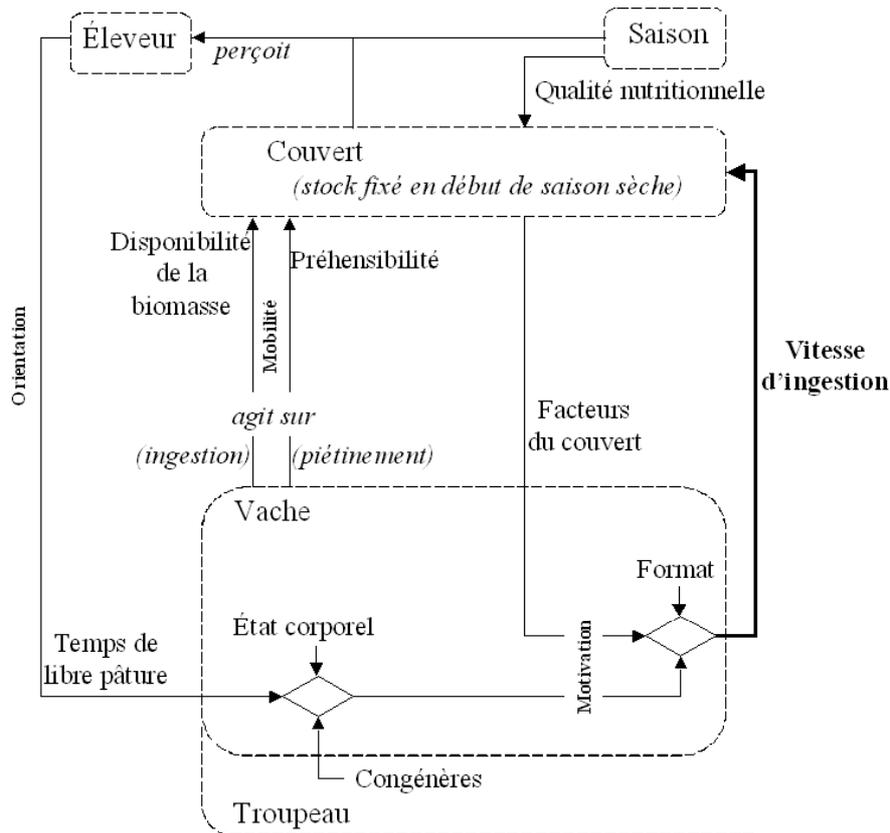


Figure 1. Représentation d'un système d'élevage divagant sur parcours, dont certaines actions (ingestion, piétinement, etc.) génèrent des facteurs de variation (préhensibilité, temps de libre pâture, etc.) des vitesses d'ingestion.

Considérant la représentation de l'intégration des facteurs de variation des VI (Fig. 1), il apparaît nettement que, d'une part, les VI s'ajustent tout à fait dans une architecture orientée objet, mais que, d'autre part, les échelles différentes d'articulation des facteurs d'influence peuvent rendre l'intégration connexionniste des VI très complexe. Pour pallier cette contrainte, dans un premier temps, il est possible d'introduire de l'aléa autour d'une courbe moyenne d'ajustement des VI de type Michaëlis-Menten. Dans tous les cas, les simulations seront plus génériques qu'avec une valeur estimée constante. L'intérêt de ces VI est double : spatialiser les prélèvements au cours des circuits quotidiens et prévoir les QI par jour. Mais prévoir les QI requiert de maîtriser les activités des animaux. Les VI sont en effet à rapporter à un temps d'ingestion sur la journée. Nous avons abordé la difficulté d'extrapoler les VI aux QI dans le chapitre 1 : l'activité de pâturage-déplacement englobe une gamme de comportements alimentaires, depuis l'ingestion stable jusqu'à un comportement de « cueillette », avec peu d'ingestion et de nombreux déplacements. Pour pallier cette difficulté d'observation, nous avons proposé une analyse spatiale des trajectoires des troupeaux, par la méthode des temps de résidence (Benhamou 2004, Barraquand and Benhamou 2008). Connaissant les activités des animaux, cette méthode permet d'appuyer objectivement les observations sur la mobilité ou, au contraire, l'inertie des troupeaux. Malgré tout, les VI instantanées restent difficiles à intégrer dans une équation de prédiction de l'ingestion à l'échelle de la journée (Boval et al. 2007). Par exemple, lorsque un individu ingère 50 g MS sur une minute, tout se passe comme si, en moyenne, il ne réitère son ingestion que deux minutes plus tard. Empiriquement, nous avons déduit de nos observations (cf. chapitre 3) qu'au cours des activités de pâturage-déplacement, les VI facilement mesurées ne couvrent en réalité qu'un tiers du temps de l'activité, environ. L'ajustement des VI par des modèles de type Michaëlis-Menten rend bien compte de leur variabilité mais ne peut prendre en compte simplement des facteurs de motivation. L'intégration de facteurs plus fin déterminant les VI dépend bien entendu du niveau de précision recherché.

2.2. Intégration des pratiques, de la polarisation des aménagements et des théories déterministes de comportement des individus

Les théories du comportement spatial des animaux, rappelées pour part dans les Conclusions partielles du chapitre 2, ont généralement été appliquées à l'échelle de l'individu (Moody and Houston 1995, Seth 2000, 2001, Jones et al. 2006). Ces théories interprètent les stratégies des individus pour améliorer leurs chances de survie et de perpétuation. C'est le « fitness » (Roguet et al. 1998). Les règles établies prennent pour large part compte de la réaction de l'animal aux ressources. Dans la théorie de l'Alimentation optimale (« Optimal foraging », Pyke 1984) sont débattues des stratégies de choix des aires de végétation, en fonction de la sensibilité des ruminants à la biomasse disponible et à sa qualité (Bergman et al. 2001). Toutefois, qu'il y ait des stratégies non liées à la ressource est également reconnue dans cette théorie. Adler et Hall (2005) ont développé une représentation d'une stratégie appelée « null foraging strategy ». Que nous ayons pris en compte des facteurs polarisant les circuits sur des aménagements, tout en intégrant la perception aux ressources fourragères, est donc quelque peu original, mais c'est aussi le respect d'un principe biologique, clairement observé (Bailey et al. 1996, Ganskopp 2001). L'abreuvement fait partie des contraintes biologiques. C'est une ressource limitante dans ces milieux. Le retour au parc de nuit (à Kolda) ou autour du campement (à Dahra) est, selon nous, d'abord une habitude. En effet, à Kolda, les veaux sont libres, et retrouvent les mères généralement sur la rizière, dans l'après-midi après l'abreuvement. Quant à la traite (i.e. facteurs de pression dans la mamelle), elle a lieu avant le départ. Nous avançons donc l'explication de l'habitude. Pour les zébus Gobra, dans la région de Dahra, il est probable que les facteurs maternels soient d'importance pour le retour à proximité du campement : les veaux y restent attachés. Même si ces facteurs sont communs à tous les systèmes d'élevage (manger, boire et retourner à l'étable), une originalité de ce travail est d'en faire des éléments explicites de structuration des circuits.

Nous avons observé que le positionnement des aménagements est en partie le fait de pratiques des éleveurs. Nous avons également montré que ces pratiques sont très structurantes des circuits des animaux, de façon surprenante pour un élevage divaguant, en première approche. En effet, outre l'attraction forte aux aménagements, nous avons mis en évidence que les pratiques des éleveurs influent sur les temps et les distances parcourues. Comme indiqué dans le chapitre 2, les durées de parcours varient surtout selon les heures de départ ($R^2 = 0,94$). Nous avons mis en évidence des corrélations plus ou moins fortes entre heures de départ et heures de lever du soleil et températures ambiantes minimales. Ces corrélations sont en accord avec les dires des éleveurs : en saison sèche froide (début à milieu de saison sèche), les éleveurs tardent à effectuer la traite. En revanche, en saison chaude (fin de saison sèche et saison des pluies), le lever du jour est plus tôt et la traite est pratiquée aux premières heures, fraîches. Concernant les distances parcourues quotidiennement, leurs évolutions sont peu liées à la raréfaction de la ressource disponible au cours de la saison sèche, puisqu'il n'y a pas d'effet fort entre périodes de saison sèche ($P > 0,05$). Nous avons observé un effet de la taille du troupeau ($P < 0,05$) : les grands troupeaux sont initialement dirigés à l'opposé du point d'eau, alors que les petits troupeaux sont moins fortement contraints. Or la relation entre les distances parcourues et l'éloignement entre les aménagements est faible ($R^2 < 0,42$). Nous avons donc émis l'hypothèse qu'il y avait une confusion entre taille de troupeau et pratique de l'éleveur. Ainsi, même pour un système d'élevage en libre pâture sur parcours, il faut lier le comportement des animaux aux pratiques de l'éleveur (Stuth and Maraschin 2000), ce qui est rarement fait (Anderson 2002). Ou alors, les études découplent (1) la composante décisionnelle de l'éleveur du (2) comportement des herbivores, comme objet d'étude permettant d'optimiser la gestion du système (Launchbaugh and Howery 2005).

L'influence des pratiques d'élevage sur les variables structurantes des circuits est un argument supplémentaire pour ne pas chercher à prédire trop précisément ces variables par des paramètres environnementaux. Notre hypothèse est bien que les temps de passage aux aménagements sont essentiels, et que ces aménagements contribuent aux distances parcourues puisqu'ils structurent les circuits. Mais la relation entre position des aménagements et distances parcourues est complexe. Les distances parcourues sont également la résultante de l'orientation

initiale des éleveurs et des activités alimentaires au cours de la journée selon les types de couverts rencontrés ou recherchés par les animaux. Nous avançons donc ici que la connaissance et la prise en compte pour un système donné des interactions entre pratiques et comportement animal est un préalable nécessaire à une modélisation du comportement des troupeaux.

2.3. Intégration des processus d'ingestion et des facteurs d'orientations des troupeaux dans un modèle spatialisé orienté agents

2.3.1. Positionner notre démarche entre réalisme, abstraction et portabilité. Il est possible de concevoir la généralité d'un modèle comme sa propriété d'être général, flexible, simple et intuitif. En d'autres termes, le concept repose sur des lois biologiques qui permettent, après ré-étalonnage, sa transposition à d'autres situations. Parallèlement à cette définition très conceptuelle, il est possible de projeter la généralité, opposée à la spécificité, entre abstraction et portabilité du modèle (Fletcher and Worthington 2009), comme illustré sur la Figure 2.

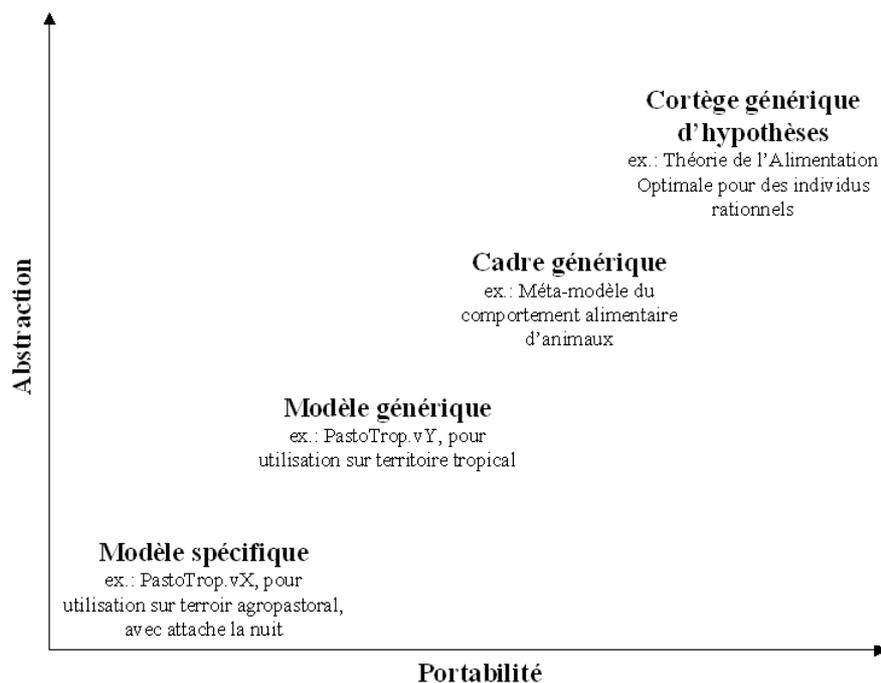


Figure 2. Conceptualisation du lien entre portabilité et abstraction d'un modèle, comme sources de généralité des processus représentés (schéma adapté d'un projet d'ingénierie, de Fletcher et Worthington, 2009).

Le réalisme est plus difficile à représenter, puisqu'il est réparti à chaque niveau du graphique (Fig. 2). En effet, la théorie de l'Alimentation optimale est réaliste en tant que cortège de réponses biologiques, malgré un haut niveau d'abstraction. Le réalisme est alors sans doute plus limité par le sous-dimensionnement d'un modèle, relativement aux objectifs définis. Nous faisons référence à une étude qui compare la maximisation du bénéfice énergétique de bovins simulés selon deux stratégies de déplacement : une marche aléatoire à biais et un déplacement selon la théorie de l'Alimentation Optimale (Farnsworth and Anderson 2001). Les auteurs concluent que la marche aléatoire à biais est plus efficace et donc émettent des réserves sur l'intérêt de l'autre théorie. Toutefois, l'environnement construit est unidimensionnel : une succession de cases de végétations (buissons ou herbacées). Le bovin simulé ne peut aller qu'à gauche ou à droite. La théorie de l'Alimentation Optimale est intégrée dans une règle de préférence de la case qui porte le plus d'herbacées en biomasse. Leur modèle est clairement sous-dimensionné, de notre point de vue, pour prétendre à une telle comparaison. Il aurait dû se limiter au diagnostic de l'utilité d'une règle simple par rapport à une règle plus complexe, dans une représentation stéréotypée d'un système divagant. L'objectif est mal défini, ou le modèle est sous-dimensionné (Belem 2009).

Notre projet, au stade actuel de la discussion, se positionnerait à l'échelle du modèle spécifique. En effet la recherche de réalisme nous a contraints à s'appuyer fortement sur une zone d'étude limitée. Cependant, compte tenu des options retenues, nous allons à présent voir en quoi notre modèle PastoTrop est porteur de généralité. Nous progresserons ensuite sur les étapes que nous entrevoyons pour augmenter la portabilité de notre modèle.

2.3.2. Reconstruire le comportement spatial et alimentaire : validation des hypothèses. Nous avons spécifiquement utilisé les données de suivis de troupeaux N'Dama sur parcours agropastoral. Le modèle PastoTrop intègre des composantes du comportement spatial et alimentaire des bovins. La prise en compte des attributs de cette zone d'étude était nécessaire pour disposer d'une description zootechnique objective des processus comportementaux des troupeaux. Nous présentons sur la Figure 3 un résumé de la démarche de reconstruction du système de troupeaux en libre pâture sur parcours, à Kolda.

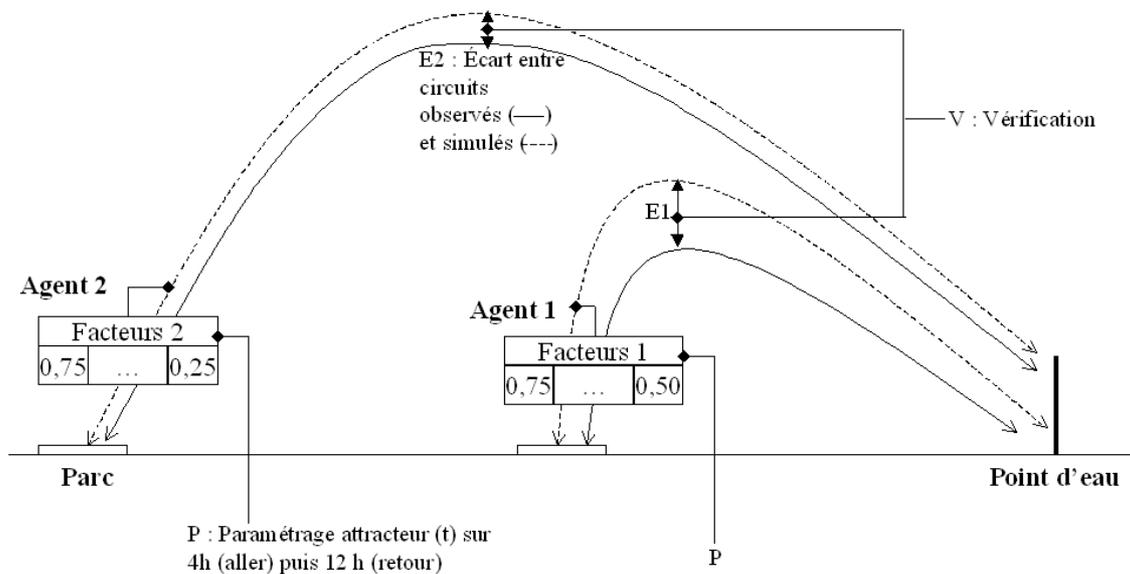


Figure 3. Processus récursif de reconstruction des circuits des troupeaux bovins observés dans la région de Kolda. Les agents Troupeaux (Agent 1 ou Agent 2), à l'attache la nuit, ont un temps de parcours de 12h maximum par jour. Ils passent nécessairement par un point d'eau. L'orientation dans l'espace résulte de deux règles de choix intégrant chacune six facteurs, liés ou non à la végétation. Le facteur d'attraction aux aménagements est temps dépendant. Le retour au parc est paramétré en fonction de l'heure observée d'attache (i.e. 12 h maximum à partir de l'heure de départ). Par la procédure de validation V, on peut vérifier l'écart E entre circuits simulés et circuits observés. Il s'agit alors de modifier les pondérations des facteurs (Facteurs i = combinaisons des pondérations des 6 facteurs par règle pour l'Agent i), simuler à nouveau et examiner les variables de sorties.

Les simulations qui ont été validées reposent sur des pondérations de ces facteurs qui ne sont pas stables entre agents, du fait de l'éloignement différent entre parc de nuit (i.e. leur position initiale) et point d'eau et des pratiques d'éleveurs qui leurs sont associées. Pour chaque agent, cinq pondérations retenues ont été présentées dans le Tableau 10 du chapitre 3. Elles sont très répétables (taux de validation d'au moins 80%). Toutefois les circuits ne sont pas uniquement déterminés par ces pondérations et la répétitivité est sensible au caractère stochastique d'un des facteurs : la marche en avant. C'est une réalité que les troupeaux évoluent dans un cône de $\pm 45^\circ$, de proche en proche. Ne pas l'avoir intégré dans le facteur de marche en avant aurait représenté un manque de réalisme et un manque d'abstraction pour travailler sur n'importe quel troupeau du territoire d'étude. Comme déjà dit, la procédure de validation (cf. V, Fig. 3) intègre six critères, dont cinq sont des variables observées. Deux conclusions majeures ont été retenues de l'application de ces procédures aux variables simulées. (1) Les combinaisons sont souvent invalidées parce qu'elles ont tendance à sous-estimer l'activité de pâturage-déplacement, et donc à

surestimer les phases de déplacement (Tab. 9, chapitre 3). Toutefois, les cinq combinaisons obtenues ont été validées sur les critères des activités : 79% pour l'agent 1 et 75% pour l'agent 2, en moyenne, de pâturage-déplacement et 11% pour l'agent 1 et 15% pour l'agent 2 de déplacement. Nous pensons donc qu'il n'est pas nécessaire de remettre en cause ces critères, en premier lieu. (2) L'agent 1, qui représente un troupeau de petit effectif (30 bêtes ou moins), est toujours invalidé sur le critère des distances parcourues quotidiennes. Ce n'est pas le cas pour l'agent 2. Afin d'être « à l'heure » aux aménagements (point d'eau puis parc de nuit) obligatoirement rejoints, l'agent 1 est localement moins sous l'influence du facteur attracteur aux aménagements que l'agent 2, directement comme indirectement. En effet, directement, la pondération du facteur attracteur est 0,75 contre 1,00 pour l'agent 2. Et indirectement, par exemple, la pondération du facteur indice d'azote est 0,50 contre 0,25 pour l'agent 2. L'interprétation est que l'agent 2, plus éloigné initialement du point d'eau, doit être plus fortement polarisé pour les critères de temps. L'agent 1, plus « détourné » du prochain aménagement à atteindre, parcourt de ce fait plus de distance qu'il n'est sensé le faire. Il est nécessaire d'intégrer un moyen d'ajuster les vitesses des agents sur le parcours. En effet, nous pensons qu'il serait nécessaire de freiner l'agent 1, afin de respecter les horaires de passage aux aménagements, tout en limitant les distances parcourues.

Malgré cette limite, le modèle est déjà transportable. Nous proposons l'adaptation de PastoTrop aux conditions pastorales du territoire sahélien de Dahra, au nord du Sénégal, sur la Figure 4. L'analyse des circuits observés en milieu et fin de saison sèche dans cette région a montré qu'une journée type d'un troupeau est : (1) les bovins sont poussés du campement en direction du forage, où ils convergent sans détours. (2.1) Après abreuvement, ils rejoignent les aires de pâturage, qui s'amenuisent au cours de la saison sèche, suivant un gradient de piétinement et d'ingestion fort aux alentours du forage (forte fréquentation d'une charge importante d'animaux) jusque dans un rayon de plus de 6 km en fin de saison sèche. (2.2) Après une halte en fin de journée, les animaux reprennent le pâturage, nocturne. C'est dans la nuit, à une heure non observée, que les animaux se rapprochent du campement, d'où ils repartiront le jour suivant venu.

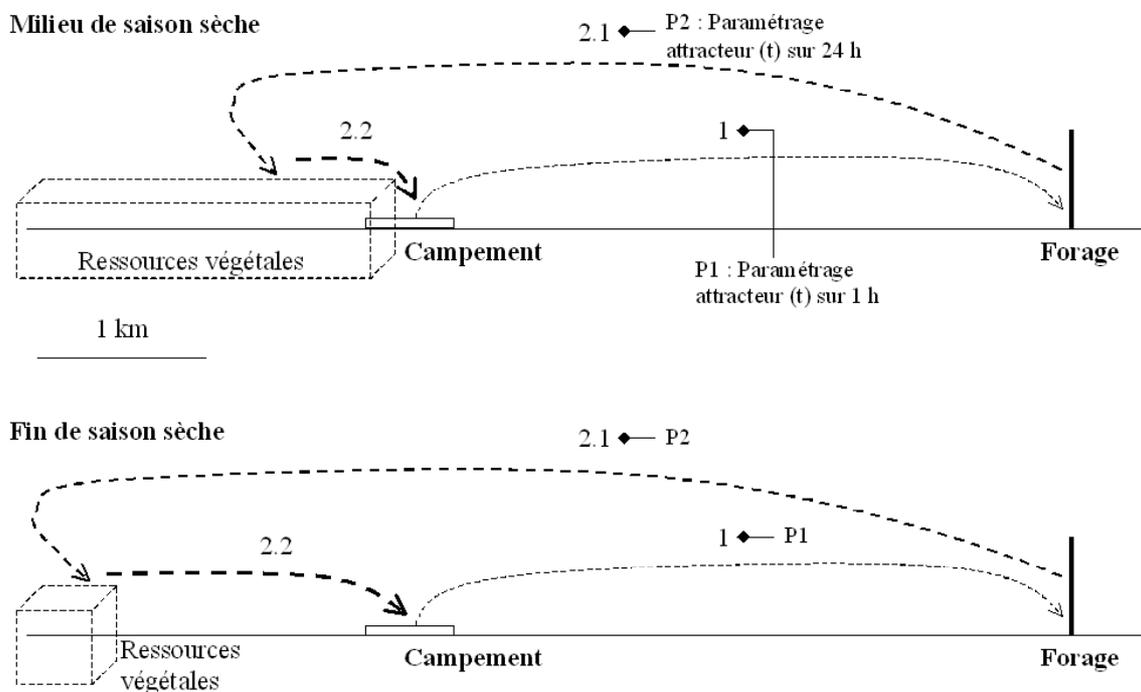


Figure 4. Proposition d'adaptation du modèle PastoTrop aux conditions pastorales sahéliennes observées dans la région de Dahra. Il ne serait nécessaire que de modifier dans le modèle les heures entrées de passage aux aménagements.

Sur la Figure 4, nous avons illustré les trois phases, sans rien modifier entre milieu et fin de saison sèche, alors que l'aire de ressource végétale utilisée s'éloigne. Nous faisons l'hypothèse que le facteur d'attraction aux aménagements reste fort (0,75 ou 1,00), localement et globalement. Les agents, sont polarisés immédiatement vers le forage, la fonction d'attraction s'exprimant fortement. Après l'abreuvement, cette même fonction est « éteinte ». Les agents doivent alors choisir à l'échelle globale les unités portant des ressources végétales. Il faut toutefois vérifier l'impact de la contrainte du facteur de moindre distance à parcourir. En effet, les facteurs liés à la végétation vont attirer les agents vers les unités de ressources, toutefois très éloignées du point d'eau, donc pénalisées par le facteur de moindre distance à parcourir. Enfin, lorsque le facteur d'attraction aux aménagements est de nouveau fort, en fin de nuit (par exemple, après 24h de parcours), les agents se retrouvent au niveau du campement.

L'hétérogénéité moindre du parcours à Dahra favorise la portabilité du modèle PastoTrop, même si dans la configuration actuelle, il n'est pas possible de valider *a priori* si les pondérations des facteurs fixées pour l'agent 1 ou pour l'agent 2 conviennent identiquement à un cas de figure sahélien. En outre, s'il semble qu'un réglage fixé pour le milieu de saison sèche s'adapte parfaitement à la fin de saison sèche, il s'agit de déterminer comment évolue la ressource végétale (Fig. 4). Elle ne peut pas évoluer par la simple action d'ingestion, même si c'est une composante forte, liée au nombre de bovins. Il y a également une composante liée au piétinement. Ces composantes combinées dans la fréquentation des différentes zones de parcours des bovins, cumulée au cours des saisons, expliquent l'absence de végétation autour des forages, et le risque de dégradation des sols (Adler et al. 2001, Sharp and Whittaker 2003, Adler and Hall 2005). Ici encore, cela nous montre que l'application du modèle nécessite d'adapter le paramétrage selon les connaissances du système et en particulier des pratiques des éleveurs.

3. PERSPECTIVES DE COMPLEXIFICATIONS ET BILAN SUR LA COLLECTE DES MESURES DE TERRAIN POUR PREDIRE LES PERFORMANCES ANIMALES A PARTIR DES CIRCUITS SIMULES

3.1. Deux contraintes majeures au réalisme à ce stade de l'étude

Des éléments précédemment présentés, deux retiennent particulièrement l'attention. (1) Les circuits simulés sont aujourd'hui un peu trop stéréotypés en terme d'activités. Il faudrait pouvoir moduler les activités de pâturage-déplacement et de déplacement simple des agents. Cela permettrait sans doute de limiter la distance parcourue par l'agent 1, sans avoir à forcer cette opération, ce qui nuirait à l'abstraction du modèle, à sa portabilité, donc à son utilisation. En outre, nous avons mis en évidence, dans le chapitre 3, que les temps de résidence (Barraquand and Benhamou 2008) sur les différentes zones du territoire agropastoral émergeant des simulations ne sont pas tout à fait équivalents de ceux observés. Par exemple, du fait du faible pouvoir polarisant du facteur d'attraction aux aménagements en début de journée, les agents sont au départ moins mobiles que dans la réalité. Il faudrait mieux ajuster l'entrelacement entre pâturage-déplacement et déplacements seuls afin de faire émerger des phases plus marquées de pâturage non stable, de pâturage stable, et de déplacements. Les alternances d'activités sont trop marquées dans les simulations par rapport aux suivis. D'autant que nous avons proposé de calculer les temps de résidence pour valider les phases d'ingestion (cf. chapitre 2 et chapitre 3).

(2) Les circuits simulés sont actuellement trop stéréotypés également en terme de lien à la ressource. N'ayant pas fait de simulations à l'échelle d'une saison sèche, nous n'avons pas fait apparaître la diminution des ressources fourragères sous l'effet des consommations et ainsi modifier les circuits. A Kolda, il faudrait dix agents Troupeaux pour mimer la charge des bovins, en terme d'ingestion et de pression sur la ressource. Toutefois, ce ne serait pas suffisant pour entrevoir l'évolution des biomasses à l'échelle des périodes de saison sèche. Le piétinement des bovins contribue aussi à la diminution des ressources ainsi qu'à l'accroissement de la préhensibilité (Fig. 1). L'effet saison que nous avons mis en évidence sur les vitesses d'ingestion (VI) à Kolda comme à Dahra (cf. § 2.1.), ne peut pas émerger des simulations à ce stade de

l'étude. Un ajustement de l'impact sur la ressource est nécessaire par la prise en compte de cet effet piétinement. Boudet (1991) estime qu'en zone sahélienne, seulement un tiers de la biomasse mesurée peut être consommé à cause du piétinement, du vent et des termites. En zone soudanienne, la moitié de la partie appétible serait consommée par le cheptel.

3.2. Passage d'une approche troupeau-centrée à une approche vache-centrée

Notre démarche s'est inspirée de la méthode KISS (Keep It Simple Stupid), qui justifie d'avancer par étape de complexification afin, surtout, de maîtriser chaque étape du processus. Toutefois, une autre méthode, KIDS (Keep It Descriptive Stupid), prône de partir à la base d'une version la plus descriptive possible des interactions observées, ce qui requiert plus de complexité (Edmonds and Moss 2005). La principale justification avancée est qu'il est malhonnête de se réfugier derrière la simplicité pour évincer les processus compliqués à représenter. De ce fait, la méthode KISS peut entraîner un sous-dimensionnement du modèle par rapport aux objectifs affichés. Ce n'est pas notre cas. Notre approche par étape, selon le principe de parcimonie, nous a permis de développer et tester des règles d'interaction entre les troupeaux et le parcours. Cela nous permet aussi de cerner les limites de l'approche troupeau-centrée et de repousser l'utilisation du modèle.

En particulier dans le cas d'ajustement des activités des agents, le passage à l'individu bovin permet d'implémenter la composante sociale (Moody and Houston 1995, Seth 2000). Entre congénères, il est reconnu qu'il existe des phénomènes de compétition et de coopération (Provenza and Balph 1988, Dumont and Boissy 1999, Coppolillo 2000). La socialité est complexe à prendre en compte, et donne lieu encore récemment à des observations, en particulier pour la compréhension du leadership spatial (Ramseyer et al. 2009a, Ramseyer et al. 2009b). De ces dernières études, le leadership pourrait s'appréhender comme des « pas de patineurs ». Selon la motivation à ingérer des animaux, évidemment corrélée aux caractéristiques du couvert consommé, ces pas de patineurs sont plus ou moins lents. En tout cas, cette vision illustre la possibilité de freiner ou, au contraire, d'accélérer des agents Vaches, donc d'influer sur leurs activités. En effet, nous sommes convaincus qu'il n'est pas utile de continuer à chercher un compromis des pondérations des facteurs des règles de choix développées, à travers l'ensemble des combinaisons non testées. Nous pensons qu'il n'est pas utile non plus de réduire la maille de définition des pondérations, fixée à 0,25. Il s'agit plutôt d'ajuster les combinaisons retenues pour les agents 1 et 2 (Tab. 10, chapitre 3), en ajoutant des modules complémentaires du comportement réel des bovins. Nous proposons ici de passer à un modèle vache-centré, et de travailler au développement d'une caractéristique de motivation (liée à l'animal en plus d'une interférence sociale), telle que nous la suggérons sur la Figure 1.

En outre, dans ces milieux complexes, la VI ne traduit qu'une faible partie du comportement alimentaire. Si nous avons mesuré ces VI *in situ* nous n'avons pas pu contrôler tous les animaux simultanément ni même uniquement un seul animal au cours d'une même journée. Toutefois, nous pensons qu'il faut conserver la détermination des VI en fonction des biomasses disponibles, selon un modèle asymptotique. Il nous faut reproduire la forte variabilité des VI (cf. § 2.1.) en la redistribuant d'une part entre les individus Vache selon leurs caractéristiques (format, stade physiologique, etc.) et d'autre part au cours du temps (temps effectif à ingérer). Il est possible d'opter pour une procédure stochastique d'attribution des VI autour de la prévision de la courbe moyenne calibrée pour chaque couvert (chapitre 1). Il faut également attribuer un temps effectif à ingérer qui permette d'obtenir des consommations quotidiennes proches des valeurs observées. Empiriquement, nous avons observé que le temps effectif se situe au tiers du temps consacré au pâturage-déplacement. Ce dernier paramètre correspond à l'ajustement des activités alimentaires que font les bovins par rapport à l'ingestion à court terme. Cette question se pose dans des dispositifs plus analytiques rendant difficile le passage des VI aux QI (Boval et al. 2007).

3.3. Conclusions générales et perspectives

Notre priorité fut de décrire, analyser puis représenter le comportement spatial et alimentaire des troupeaux bovins en libre pâture, en suivant la méthode KISS. Les observations de terrain effectuées pour aboutir à la version v2.2 de PastoTrop furent nécessaires et suffisantes. Il nous a été possible de représenter de façon intégrative, simple et transposable le comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours agropastoral tropical. Il est possible de spatialiser les prélèvements de fourrage et l'excrétion fécale. Ces éléments ouvrent des perspectives de test de l'intensification écologique par modélisation.

Les deux papiers analytiques sur l'ingestion et les circuits permettent d'en savoir beaucoup plus sur les interactions entre les animaux et les ressources alimentaires. Sur l'ingestion (cf. § 2.1.), nous avons proposé des valeurs de VI, en prenant en compte l'hétérogénéité des couverts, entre autres. Certes, la variabilité de ces VI est importante, mais les éléments de discussion de son analyse indiquent des pistes intéressantes sur les déterminants des VI de ces bovins tropicaux de petit format. En particulier, le classement des VI par couverts fut un moyen opérationnel pour avancer sur la prise en compte des facteurs de disponibilité de la biomasse, de préhensibilité ou de valeur alimentaire. En outre, relativement aux activités, nous avons montré l'importance de l'activité de pâturage-déplacement mais alternant et parfois peu distinctes avec d'autres activités, ce qui rend difficile l'extrapolation des VI aux QI. Les QI ont par ailleurs été déterminées par deux méthodes à partir de fèces collectés. Cela était nécessaire pour valider les consommations de matière sèche progressivement au cours du circuit des troupeaux.

Sur les circuits (cf. § 2.2.), nous avons principalement mis en évidence la nécessité de prendre en compte les pratiques des éleveurs et les effets polarisant des aménagements abiotiques dans l'analyse des circuits des troupeaux. Nous avons alors pu intégrer le comportement spatial et alimentaire des animaux dans le modèle PastoTrop. La Figure 5 rassemble les étapes de construction de l'intégration des éléments du libre pâturage en milieu complexe.

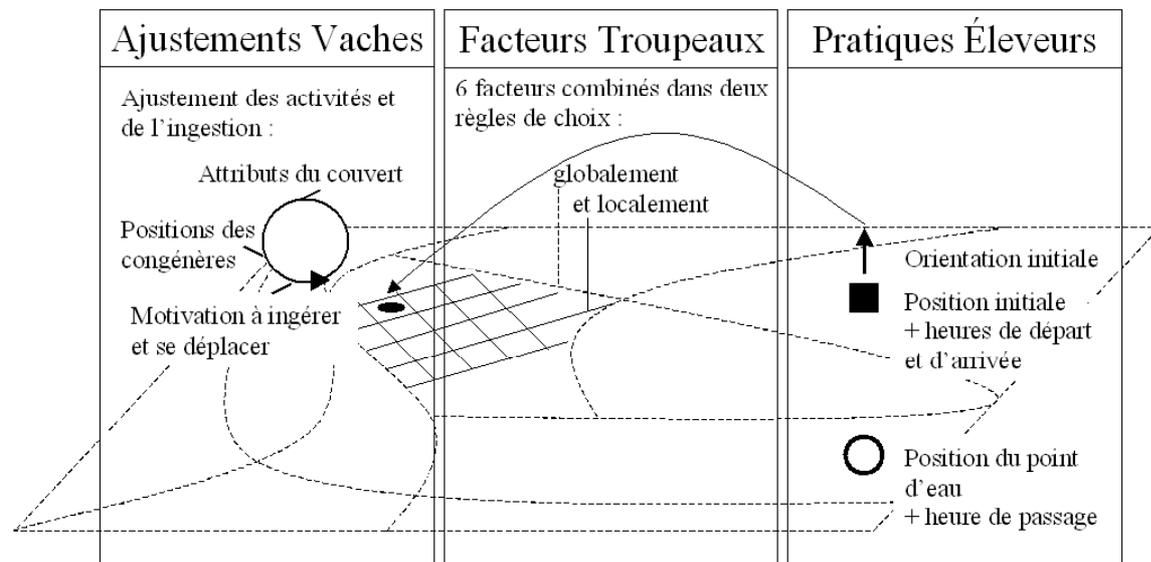


Figure 5. Schéma d'encapsulation des grandes entités agissantes dans la représentation du comportement spatial et alimentaire de bovins en libre pâture sur parcours tropical. Les agents Vaches composent des entités Troupeaux, organisées par des entités Eleveurs. Les choix, globalement et localement sont effectués au niveau du troupeau. Mais localement, le choix est ajusté par la vache, ce qui peut moduler son activité et son ingestion.

En terme d'impact des troupeaux sur les parcours (sols et végétations), nous n'avons pas suffisamment de données pour valider une démarche de représentation, que nous n'avons donc pas abordée. En terme de couplage entre parcours et performances, il faut passer du comportement spatial et alimentaire du troupeau au bilan alimentaire plus fin des individus, aux besoins en énergie et en azote bien déterminés quotidiennement, ingérant une ressource dont la qualité

nutritionnelle est bien définie. Là encore, nous sommes restés à un niveau trop agrégé de la ressource pour représenter avec réalisme l'ingestion de nutriment. Nous avons commencé, logiquement, par l'ingestion de matière sèche. Nous n'avons donc abordé que les premiers éléments des apports. Il faudra également intégrer un module de besoins des individus. Des références existent pour les bovins tropicaux (Ezanno 2002, Henrique et al. 2005). En particulier, des travaux abordent le surcoût énergétique lié aux déplacements (Dijkman and Lawrence 1997, Lachica and Aguilera 2005, Brosh et al. 2006).

Le « mode d'emploi » de la représentation d'un système d'élevage de bovins en libre pâture doit permettre d'utiliser le modèle PastoTrop dans d'autres zones sèches. En particulier, pour les zones pastorales sahéliennes (cf. Dahra, § 2.3.2.), nous avons discuté de l'adaptation *a priori* simple du modèle. Il faut à présent avancer sur la définition de la ressource fourragère, sur la régulation de la motivation individuelle à ingérer, avec la prise en compte des phénomènes liés à la socialité, ainsi que sur l'ingestion instantanée, que nous avons déjà largement défrichée. L'approche proposée par le modèle PastoTrop ne doit pas perdre en réalisme pour toute composante comportementale ou sur la ressource qui serait ajoutée pour atteindre plus complètement des objectifs de développement durable (amélioration des performances animales, durabilité des pratiques agraires, préservation de l'environnement).

Elements bibliographiques

Bibliographie

- Abdalla, M. Y., and A. S. Elsheikh. 2008. Postpartum interval of Darfurian cows: Influences of breed, BCS, parity and season. *African Journal of Agricultural Research* 3:499-504.
- Adler, P. B., and S. A. Hall. 2005. The development of forage production and utilization gradients around livestock watering points. *Landscape Ecology* 20:319-333.
- Adler, P. B., D. Raff, and W. Lauenroth. 2001. The effect of grazing on the spatial heterogeneity of vegetation. *Oecologia* 128:465-479.
- Agreil, C., and M. Meuret. 2004. An improved method for quantifying intake rate and ingestive behaviour of ruminants in diverse and variable habitats using direct observation. *Small Ruminant Research* 54:99-113.
- Agreil, C., M. Meuret, and H. Fritz. 2006. Adjustment of feeding choices and intake by a ruminant foraging in varied and variable environments: new insights from continuous bite monitoring. In: V. Bels [ed.]. *Feeding in domestic vertebrates: from structure to behaviour*. Cab International. p. 302-325.
- Anderson, J. J. 2002. An agent-based event driven foraging model. *Natural Resource Modeling* 15:55-81.
- Andrieu, N., F. Coléno, and D. M. 2008. L'organisation du système fourrager source de flexibilité face aux variations climatiques. In: B. Dedieu, E. Chia, B. Leclerc, C.-H. Moulin, and M. Tichit [eds]. *L'élevage en mouvement: Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*. Quae, Paris, France. p. 95-110.
- Ayantunde, A. A., S. Fernandez-Rivera, P. Hiernaux, H. van Keulen, H. M. J. Udo, and M. Chanono. 2001. Effects of timing and duration of grazing of growing cattle in the West African Sahel on diet selection, faecal output, eating time, forage intake and live-weight changes. *Animal Science* 72:117-128.
- Ayantunde, A. A., P. Hiernaux, S. Fernandez-Rivera, H. van Keulen, and H. M. J. Udo. 1999. Selective grazing by cattle on spatially and seasonally heterogeneous rangeland in Sahel. *Journal of Arid Environments* 42:261-279.
- Babatounde, S., H. Sidi, M. Houinato, G. A. Mensah, and A. B. Sinsin. 2009. Comportement alimentaire des taurins de race Borgou sur des jachères de la zone nord soudanienne du Bénin. In: Institut de l'élevage and INRA [eds]. *Rencontres Recherches Ruminants*, Paris, France. p. 29-32.
- Bailey, D. W. 2005. Identification and Creation of Optimum Habitat Conditions for Livestock. *Rangeland Ecology & Management* 58:109-118.
- Bailey, D. W., J. E. Gross, E. A. Laca, L. R. Rittenhouse, M. B. Coughenour, D. M. Swift, and P. L. Sims. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management* 49:386-400.
- Barraquand, F., and S. Benhamou. 2008. Animal movements in heterogeneous landscapes: identifying profitable places and homogeneous movement bouts. *Ecology* 89:3336-3348.
- Bartumeus, F., J. Catalan, G. M. Viswanathan, E. P. Raposo, and M. G. E. da Luz. 2008. The influence of turning angles on the success of non-oriented animal searches. *Journal of Theoretical Biology* 252:43-55.
- Bassett, T. J., C. Blanc-Pamard, and J. Boutrais. 2007. Constructing Locality: The Terroir Approach in West Africa. *Africa* 77:104-129.
- Bayer, W. 1990. Behavioural compensation for limited grazing time by herded cattle in central Nigeria. *Applied Animal Behaviour Science* 27:9-19.
- Beecham, J. A., and K. D. Farnsworth. 1998. Animal foraging from an individual perspective: an object orientated model. *Ecological Modelling* 113:141-156.
- Behnke, R. H., and I. Scoones. 1993. Rethinking range ecology: implications for rangeland management in Africa. In: R. H. Behnke, I. Scoones, and C. Kerven [eds]. *Range Ecology at Disequilibrium. New Models of Natural Variability and Pastoral Adaptation in African Savannas*. ODI Publications London, UK. p. 1-30.

- Belem, M. 2009. A conceptual model for multi-point of view analysis of complex systems: application to the analysis of the carbon dynamics of village territories of the West-African Savanna. Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale Abies - Agro Paris Tech, Paris, France.
- Benhamou, S. 2004. How to reliably estimate the tortuosity of an animal's path: straightness, sinuosity, or fractal dimension? *Journal of Theoretical Biology* 229:209-220.
- Benvenuti, M. A., I. J. Gordon, and D. P. Poppi. 2008. The effects of stem density of tropical swards and age of grazing cattle on their foraging behaviour. *Grass and Forage Science* 63:1-8.
- Benvenuti, M. A., I. J. Gordon, D. P. Poppi, R. Crowther, W. Spinks, and F. C. Moreno. 2009. The horizontal barrier effect of stems on the foraging behaviour of cattle grazing five tropical grasses. *Livestock Science* 126:229-238.
- Bergman, C. M., J. M. Fryxell, C. C. Gates, and D. Fortin. 2001. Ungulate foraging strategies: energy maximizing or time minimizing? *Journal of Animal Ecology* 70:289-300.
- Blanc, F., and F. Bocquier. 2008. La composante animale de la flexibilité des systèmes d'élevage. In: B. Dedieu, E. Chia, B. Leclerc, C.-H. Moulin, and M. Tichit [eds]. *L'élevage en mouvement: Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*. Quae, Paris, France. p. 73-94.
- Blanc, F., F. Bocquier, J. Agabriel, P. D'hour, and Y. Chilliard. 2006. Adaptive abilities of the females and sustainability of ruminant livestock systems. A review. *Animal Research* 55:489-510.
- Bosso, N. A., E. H. van der Waaij, K. Agyemang, and J. A. M. van Arendonk. 2009. Genetic parameters for growth traits in N'Dama cattle under tsetse challenge in the Gambia. *Livestock Research for Rural Development* 21.
- Boudet, G. 1991. Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. In: Ministère de la coopération and CIRAD-EMVT [eds]. *Manuels et précis d'élevage*, Maison-Alfort, France. 266 p.
- Bouissou, M.-F., and A. Boissy. 2005. Le comportement social des bovins et ses conséquences en élevage. *INRA Productions Animales* 18:87-99.
- Boval, M., A. Fanchone, H. Archimede, and M. J. Gibb. 2007. Effect of structure of a tropical pasture on ingestive behaviour, digestibility of diet and daily intake by grazing cattle. *Grass and Forage Science* 62:44-54.
- Brosh, A., Z. Henkin, E. D. Ungar, A. Dolev, A. Orlov, Y. Yehuda, and Y. Aharoni. 2006. Energy cost of cows' grazing activity: Use of the heart rate method and the Global Positioning System for direct field estimation. *Journal of Animal Science* 84:1951-1967.
- Cambier, C., A. Ickowicz, M. Maury, and R. J. Manlay. 2005. Modèle de comportement spatial de troupeaux de bovins pour la gestion d'un terroir. In: Joint Conference on Multi-Agent Modelling for Environmental Management, Bourg St Maurice – Les Arcs, France.
- Caron, P. 2005. À quels territoires s'intéressent les agronomes ? Le point de vue d'un géographe tropicaliste. *Natures Sciences Sociétés* 13:145-153.
- Cissé, M., Y. Chilliard, F. Bocquier, I. Ly, and A. Grégoire. 1999. The biological significance of the body condition score in terms of body lipid and energy content in zebu cattle (*Bos indicus*). Comparison between two scoring scales. *South African Journal of Animal Science* 29:197-198.
- Cissé, M., D. Ditaroh, A. Korrea, I. Ly, and D. Richard. 2003. Change in body condition of Gobra zebu cattle under different level of feeding. Relationship with body lipids and energy. *Journal of Animal and Feed Sciences* 12:487-497.
- Clanet, J. C. 1994. Géographie pastorale au Sahel central. *Journal des africanistes* 64:159 - 161.
- Coppolillo, P. 2000. The Landscape Ecology of Pastoral Herding: Spatial Analysis of Land Use and Livestock Production in East Africa. *Human Ecology* 28:527-560.
- Couzin, I. D., J. Krause, N. R. Franks, and S. A. Levin. 2005. Effective leadership and decision making in animal groups on the move. *Nature* 433:513-516.
- de Ridder, N., and H. Breman. 1991. A New Approach to Evaluating Rangeland Productivity in Sahelian Countries. In: R. H. Behnke, I. Scoones, and C. Kerven [eds]. *Range Ecology at Disequilibrium. New Models of Natural Variability and Pastoral Adaptation in African Savannas*. ODI Publications, London, UK. p. 104-117.
- Dedieu, B., E. Chia, B. Leclerc, C.-H. Moulin, and M. Tichit. 2008a. Introduction. In: B. Dedieu, E. Chia, B. Leclerc, C.-H. Moulin, and M. Tichit [eds]. *L'élevage en mouvement: Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*. Quae, Paris, France. p. 9-19.

- Dedieu, B., F. Louault, H. Tournadre, and M. Benoit. 2008b. Réponse de systèmes d'élevage innovants à la variabilité climatique: une expérimentation en production extensive ovin viande intégrant des préoccupations environnementales. *In*: B. Dedieu, E. Chia, B. Leclerc, C.-H. Moulin, and M. Tichit [eds]. L'élevage en mouvement: Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Quae, Paris, France. p. 161-178.
- Delagarde, R., and M. O'Donovan. 2005. Les modèles de prévision de l'ingestion journalière d'herbe et de la production laitière des vaches au pâturage. *INRA Productions Animales* 18:241-253.
- Dicko, M. S., and M. Sangare. 1991. Foraging behaviour of cattle in their natural environment in semi arid Mali : speed of grazing and rate of mouthfuls. *In*: A. Gaston, M. Kernick, and H.-N. Le Houérou [eds]. Actes du quatrième congrès international des terres de parcours. Proceedings of the fourth international rangeland congress. CIRAD, Montpellier, France. p. 625-628.
- Dijkman, J. T., and P. R. Lawrence. 1997. The energy expenditure of cattle and buffaloes walking and working in different soil conditions. *The Journal of Agricultural Science* 126:95-103.
- Dumont, B. 1996. Préférences et sélection alimentaire au pâturage. *INRA Productions Animales* 9:359-366.
- Dumont, B., and A. Boissy. 1999. Relations sociales et comportement alimentaire au pâturage. *INRA Productions Animales* 12:3-10.
- Dumont, B., A. Boissy, C. Achard, A. M. Sibbald, and H. W. Erhard. 2005. Consistency of animal order in spontaneous group movements allows the measurement of leadership in a group of grazing heifers. *Applied Animal Behaviour Science* 95:55-66.
- Dumont, B., and D. R. C. Hill. 2001. Multi-agent simulation of group foraging in sheep: effects of spatial memory, conspecific attraction and plot size. *Ecological Modelling* 141:201-215.
- Edmonds, B., and S. Moss. 2005. From KISS to KIDS. An 'Anti-simplistic' Modelling Approach. *In*: P. Davidsson [ed]. LNCS. Springer-Verlag, Berlin, Germany. p. 130-144.
- Edouard, N., G. Fleurance, B. Dumont, R. Baumont, and P. Duncan. 2009. Does sward height affect feeding patch choice and voluntary intake in horses? *Applied Animal Behaviour Science* 119:219-228.
- Etzenhouser, M. J., M. K. Owens, D. E. Spalinger, and S. B. Murden. 1998. Foraging behavior of browsing ruminants in a heterogeneous landscape. *Landscape Ecology* 13:55-64.
- Ezanno, P. 2002. Modélisation de la relation entre l'état corporel et la productivité des troupeaux bovins - Cas des bovins N'Dama en milieu agro-pastoral extensif de zone tropicale humide (Kolda, Sénégal). Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale Biologie Intégrative - Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, Montpellier, France.
- Ezanno, P., A. Ickowicz, and F. Bocquier. 2003. Factors affecting the body condition score of N'Dama cows under extensive range management in Southern Senegal. *Animal Research* 52:37-48.
- Ezanno, P., A. Ickowicz, and R. Lancelot. 2005. Relationships between N'Dama cow body condition score and production performance under an extensive range management system in Southern Senegal: calf weight gain, milk production, probability of pregnancy, and juvenile mortality. *Livestock Production Science* 92:291-306.
- FAO. en ligne. Oryza sativa, pailles de riz. *In*: Système d'information sur les ressources en alimentation animale. Disponible sur : <http://www.fao.org/ag/AGA/AGAP/FRG/AFRIS/Fr/Data/550.HTM>. Consulté le 15 mai 2009.
- Farnsworth, K. D., and A. R. A. Anderson. 2001. How simple grazing rules can lead to persistent boundaries in vegetation communities. *Oikos* 95:15-24.
- Ferber, J. 1995. Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective. InterEditions, Paris.
- Fletcher, A., and D. Worthington. 2009. What is a 'generic' hospital model? A comparison of 'generic' and 'specific' hospital models of emergency patient flows. *Health Care Management Science* 12:374-391.
- Fowler, M., and K. Scott. 2001. UML, le Tout en Poche. CampusPress [ed], Paris, France.
- Fuhlendorf, S. D., and D. M. Engle. 2001. Restoring heterogeneity on rangelands: ecosystem management based on evolutionary grazing patterns. *BioScience* 51:625-632.
- Fynn, R. W. S., and T. G. O'Connor. 2000. Effect of stocking rate and rainfall on rangeland dynamics and cattle performance in a semi-arid savanna, South Africa. *Journal of Applied Ecology* 37:491-507.

- Ganskopp, D. 2001. Manipulating cattle distribution with salt and water in large arid-land pastures: a GPS/GIS assessment. *Applied Animal Behaviour Science* 73:251-262.
- Ganskopp, D., R. Cruz, and D. E. Johnson. 2000. Least-effort pathways?: a GIS analysis of livestock trails in rugged terrain. *Applied Animal Behaviour Science* 68:179-190.
- Garine-Wichatitsky, M., H. Fritz, I. Gordon, and A. Illius. 2004. Bush selection along foraging pathways by sympatric impala and greater kudu. *Oecologia* 141:66-75.
- Gibb, M. J., C. A. Huckle, and R. Nuthall. 1998. Effect of time of day on grazing behaviour by lactating dairy cows. *Grass and Forage Science* 53:41-46.
- Ginnett, T. F., J. A. Dankosky, G. Deo, and M. W. Demment. 1999. Patch depression in grazers: the roles of biomass distribution and residual stems. *Functional Ecology* 13:37-44.
- Gordon, I. J. 2000. Plant-Animal Interactions in Complex Plant Communities: from Mechanism to Modelling. In: G. Lemaire [ed]. *Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology*. p. 191-207.
- Grimm, V. 1999. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? *Ecological Modelling* 115:129-148.
- Grimm, V., U. Berger, F. Bastiansen, S. Eliassen, V. Ginot, J. Giske, J. Goss-Custard, T. Grand, S. K. Heinz, G. Huse, A. Huth, J. U. Jepsen, C. Jørgensen, W. M. Mooij, B. Müller, G. Pe'er, C. Piou, S. F. Railsback, A. M. Robbins, M. M. Robbins, E. Rossmanith, N. Rüger, E. Strand, S. Souissi, R. A. Stillman, R. Vabø, U. Visser, and D. L. DeAngelis. 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling* 98:115-126.
- Guérin, H., D. Richard, D. Friot, and N. Mbaye. 1986. Les choix alimentaires des bovins et ovins sur pâturages sahéliens. *Reproduction Nutrition Development* 26:269-270.
- Guire, A. T. 2005. Introduction. In: Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal 1964-2004.
- Harris, N. R., D. E. Johnson, N. K. McDougald, and M. R. George. 2007. Social Associations and Dominance of Individuals in Small Herds of Cattle. *Rangeland Ecology & Management* 60:339-349.
- Henrique, D. S., R. A. M. Vieira, P. A. M. Malafaia, M. C. Mancini, and A. L. Gonçalves. 2005. Estimation of the total efficiency of metabolizable energy utilization for maintenance and growth by cattle in tropical conditions. *Revista Brasileira de Zootecnia* 34:1006-1016.
- Hirvonen, H., E. Ranta, H. Rita, and N. Peuhkuri. 1999. Significance of memory properties in prey choice decisions. *Ecological Modelling* 115:177-189.
- Hodgkinson, K. C. 1991. Identification of critical thresholds for opportunistic management of rangeland vegetation. In: A. Gaston, M. Kernick, and H.-N. Le Houérou [eds]. *Actes du quatrième congrès international des terres de parcours. Proceedings of the fourth international rangeland congress*. CIRAD, Montpellier, France. p. 127-129.
- Hodgson, J. 1986. Grazing behaviour and herbage intake. In: British Grassland Society. *Occasional Symposium*. p. 51-64.
- Hoffmann, I., D. Gerling, U. B. Kyiogwom, and A. Mane-Bielfeldt. 2001. Farmers' management strategies to maintain soil fertility in a remote area in northwest Nigeria. *Agriculture Ecosystems & Environment* 86:263-275.
- Holling, C. S. 2001. Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. *Ecosystems* 4:390-405.
- Ickowicz, A., and M. Mbaye. 2001. Forêts soudaniennes et alimentation des bovins au Sénégal : potentiel et limites. *Bois et forêts des tropiques* 270:47-61.
- Illius, A. W., and T. G. O'Connor. 2000. Resource heterogeneity and ungulate population dynamics. *Oikos* 89:283-294.
- INRA. 1989. Ruminant nutrition. Recommended allowances and feed tables. R. Jarrige [ed]. INRA and John Libbey Eurotext Paris, France, London, England.
- ISRA. 2003. Rapport national sur l'état des ressources zoogénétiques au Sénégal. Dakar, Sénégal.
- Jones, O. R., J. G. Pilkington, and M. J. Crawley. 2006. Distribution of a naturally fluctuating ungulate population among heterogeneous plant communities: ideal and free? *Journal of Animal Ecology* 75:1387-1392.
- Jouven, M. 2006. Quels équilibres entre production animale et utilisation durable des prairies dans les systèmes bovins allaitants herbagers ? Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale Abies - Institut National Agronomique de Paris-Grignon, Paris, France.

- Kennedy, P. M. 1995. Comparative adaptability of herbivores to tropical environments. *In*: M. Journet, E. Grenet, M.-H. Farce, M. Thériez, and C. Demarquilly [eds]. Recent Developments in the nutrition of herbivores - Proceedings of the IVth International Symposium on the Nutrition of Herbivores, Clermont-Ferrand (France). INRA, Paris, France. p. 309-328.
- Knopf, L., O. C. Komoin, B. Betschart, B. Gottstein, and J. Zinsstag. 2004. Production and health parameters of N'Dama village cattle in relation to parasitism in the guinea savannah of Côte d'Ivoire. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* 57:95-100.
- Koerth, B. H., and J. W. Stuth. 1991. Instantaneous intake rates of 9 browse species by white-tailed deer. *Journal of Range Management* 44:614-618.
- Laca, E. A. 1998. Spatial memory and food searching mechanisms of cattle. *Journal of Range Management* 51:370-378.
- Laca, E. A., and M. W. Demment. 1996. Foraging Strategies of Grazing Animals. *In*: J. Hodgson and A. W. Illius [eds]. The Ecology and Management of Grazing Systems. CAB International, Wallingford, UK. p. 137-158.
- Lachica, M., and J. F. Aguilera. 2005. Energy expenditure of walk in grassland for small ruminants. *Small Ruminant Research* 59:105-121.
- Lalba, A., J. Sibiri Zoundi, and J.-P. Tiendrébéogo. 2005. Politiques agricoles et accès aux parcours communs dans le terroir de Ouara à l'ouest du Burkina Faso : une analyse économique et environnementale à l'aide de la programmation linéaire. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 9:43-52.
- Landais, E. 1987. Recherches sur les systèmes d'élevage : questions et perspectives. INRA - URSAD, Versailles, France.
- Landais, E., P. Lhoste, and H. Guérin. 1990. Systèmes d'élevage et transferts de fertilité. *In*: A. C. M. Coop [ed]. Rencontres Internationales "Savanes d'Afrique, terres fertiles?", Montpellier, France. p. 219-270.
- Launchbaugh, K. L., and L. D. Howery. 2005. Understanding Landscape Use Patterns of Livestock as a Consequence of Foraging Behavior. *Rangeland Ecology & Management* 58:99-108.
- Le Moigne, J.-L. 1977. La théorie du système général, théorie de la modélisation. Presses Universitaires de France, Paris, France.
- Le Moigne, J.-L. 1990. La modélisation des systèmes complexes. Dunod [ed], Paris, France.
- Lecomte, P., F. Safietou, D. Friot, D. Richard, A. Ickowicz, H. Guérin, and L. Bonnal. 2003. Calibrating in vivo feeding value parameters on faeces NIRs spectral data's. Case of rations fed to tropical ruminants (Senegal). *In*: Institut de l'élevage and INRA [eds]. Rencontres Recherches Ruminants, Paris, France. p. 171.
- Manlay, R. J., P. Cadet, J. Thioulouse, and J.-L. Chotte. 2000. Relationships between abiotic and biotic soil properties during fallow periods in the sudanian zone of Senegal. *Applied Soil Ecology* 14:89-101.
- Manlay, R. J., A. Ickowicz, D. Masse, C. Feller, and D. Richard. 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.
- Marichatou, H., A. S. Gouro, and A. B. Kanwe. 2005. Production laitière de la race Gudhali et croissance des jeunes purs et croisés, en zone périurbaine de Bobo-Dioulasso (Burkina Fasso). *Cahiers d'Agricultures* 14:291-296.
- Masse, D., R. J. Manlay, M. Diatta, R. Pontanier, and J. L. Chotte. 2004. Soil properties and plant production after short-term fallows in Senegal. *Soil Use and Management* 20:92-95.
- Missohou, A., A. A. Bankole, A. T. Niang, G. Ragounandea, E. Talaki, and I. Bitar. 1997. The Gobra: breed characteristics and and performance traits. *Animal Genetic Resources Information* 22:53-60.
- Moody, A. L., and A. I. Houston. 1995. Interference and the ideal free distribution. *Animal Behaviour* 49:1065-1072.
- Morales, J. M., and S. P. Ellner. 2002. Scaling up movements in heterogeneous landscapes: the importance of behavior. *Ecology* 83:2240-2247.
- Mueller, T., and W. F. Fagan. 2008. Search and navigation in dynamic environments - from individual behaviors to population distributions. *Oikos* 117:654-664.

- Müller, J.-P., and P. Bommel. 2007. An introduction to UML for modeling in the human and social sciences. *In: D. Phan and F. Amblard [eds]. Multi-Agent Systems for Human and Social Sciences* Bardwell press, Oxford, UK. p. 1-16.
- Nams, V. O. 2005. Using animal movement paths to measure response to spatial scale. *Oecologia* 143:179-188.
- Ngodigha, E. M., and U. I. Oji. 2009. Evaluation of fodder potential of some tropical browse plants using fistulated N'dama cattle. *African Journal of Agricultural Research* 4:241-246.
- Ngongoni, N. T., C. Mapiye, M. Mwale, B. Mupeta, and M. Chimonyo. 2007. Potential of farm-produced crop residues as protein sources for small-medium yielding dairy cows. *African Journal of Agricultural Research* 2:309-317.
- Ouedraogo-Kone, S., C. Y. Kabore-Zoungrana, and I. Ledin. 2006. Behaviour of goats, sheep and cattle on natural pasture in the sub-humid zone of West Africa. *Livestock Science* 105:244-252.
- Ouedraogo-Kone, S., C. Y. Kabore-Zoungrana, and I. Ledin. 2008. Important characteristics of some browse species in an agrosilvopastoral system in West Africa. *Agroforestry Systems* 74:213-221.
- Parsons, A. J., and B. Dumont. 2003. Spatial heterogeneity and grazing processes. *Animal Research* 52:161-179.
- Perrier, E. 2002. Modélisation mathématique et informatique de structures naturelles complexes en interaction avec des dynamiques de flux. Applications hydro-pédologiques. Habilitation à Diriger des Recherches. Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Paris, France.
- Perrings, C., and B. Walker. 1997. Biodiversity, resilience and the control of ecological-economic systems: the case of fire-driven rangelands. *Ecological Economics* 22:73-83.
- Peyraud, J.-L., and L. Delaby. 2005. Combiner la gestion optimale du pâturage et les performances des vaches laitières : enjeux et outils. *INRA Productions Animales* 18:231-240.
- Pickup, G., G. N. Bastin, and V. H. Chewings. 1998. Identifying trends in land degradation in non-equilibrium rangelands. *Journal of Applied Ecology* 35:365-377.
- Prache, S., and J.-L. Peyraud. 1997. Préhensibilité de l'herbe pâturée chez les bovins et les ovins. *INRA Productions Animales* 10:377-390.
- Provenza, F. D., and D. F. Balph. 1988. Development of dietary choice in livestock on rangelands and its implications for management. *Journal of Animal Science* 66:2356-2368.
- Pyke, G. H. 1984. Optimal Foraging Theory: A Critical Review. *Annual Review of Ecology and Systematics* 15:523-575.
- Ramseyer, A., A. Boissy, B. Dumont, and B. Thierry. 2009a. Decision making in group departures of sheep in a continuous process. *Animal Behaviour* 78:71-78.
- Ramseyer, A., B. Thierry, A. Boissy, and B. Dumont. 2009b. Decision-making processes in group departures of cattle. *Ethology* 115:948-957.
- Reinhardt, V. 1983. Movement orders and leadership in a semi-wild cattle herd. *Behaviour* 77:251-264.
- Rekwota, P., D. Ogwub, E. Oyedipea, and V. Sekoni. 2000. Effects of bull exposure and body growth on onset of puberty in Bunaji and Friesian x Bunaji heifers. *Reproduction Nutrition Development* 40:359-367
- Reynolds, C. W. 1987. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. *In: Computer Graphics. SIGGRAPH '87 Conference Proceedings.* p. 25-34.
- Rietkerk, M., P. Ketner, J. Burger, B. Hoorens, and H. Olf. 2000. Multiscale soil and vegetation patchiness along a gradient of herbivore impact in a semi-arid grazing system in West Africa. *Plant Ecology* 148:207-224.
- Rittenhouse, L. R. 1991. Spatial decisions by large ungulates. *In: A. Gaston, M. Kernick, and H.-N. Le Houérou [eds]. Actes du quatrième congrès international des terres de parcours. Proceedings of the fourth international rangeland congress.* CIRAD, Montpellier, France. p. 658-659.
- Rodriguez, L. 2008. Une perspective mondiale sur la valeur économique totale du pastoralisme : Un rapport de synthèse global basé sur six évaluations pays. IMPD - GEF - PNUD - IUCN, Nairobi, Kenya.

- Roese, J. H., K. L. Risenhoover, and L. J. Folse. 1991. Habitat heterogeneity and foraging efficiency: an individual-based model. *Ecological Modelling* 57:133-143.
- Rogotic, J., J. A. Pfister, F. D. Provenza, and D. Grbesa. 2006. Sheep and goat preference for and nutritional value of Mediterranean maquis shrubs. *Small Ruminant Research* 64:169-179.
- Roguet, C., B. Dumont, and S. Prache. 1998. Sélection et utilisation des ressources fourragères par les herbivores : théories et expérimentations à l'échelle du site et de la station alimentaires. *INRA Productions Animales* 11:273-284.
- Rook, A. J., S. J. Rodway-Dyer, and J. E. Cook. 2005. Effects of resource density on spatial memory and learning by foraging sheep. *Applied Animal Behaviour Science* 95:143-151.
- Sanon, H. O., C. Kabore-Zoungrana, and I. Ledin. 2007. Behaviour of goats, sheep and cattle and their selection of browse species on natural pasture in a Sahelian area. *Small Ruminant Research* 67:64-74.
- Savadogo, P., L. Sawadogo, and D. Tiveau. 2007. Effects of grazing intensity and prescribed fire on soil physical and hydrological properties and pasture yield in the savanna woodlands of Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118:80-92.
- Secka, Y., A. Ickowicz, and O. Dassering. 1991. Le réseau d'observation des pâturages naturels du Tchad - Alerte précoce et surveillance continue (ROPANAT). In: A. Gaston, M. Kernick, and H.-N. Le Houérou [eds]. Actes du quatrième congrès international des terres de parcours. Proceedings of the fourth international rangeland congress. CIRAD, Montpellier, France. p. 54-58.
- Sere, C., H. Steinfeld, and J. Groenewold. 1995. World livestock production systems. FAO Animal Production And Health Paper, LEAD, Roma, Italia.
- Seth, A. K. 2000. Unorthodox optimal foraging theory. In: J. Meyer, A. Berthoz, D. Floreano, H. Roitblat, J.-D. Nicoud, and F. Mondada [eds]. From animals to animats: Proceedings of the Sixth International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior. MIT Press, Cambridge, UK. p. 478-481.
- Seth, A. K. 2001. Modelling group foraging: Individual suboptimality, interference, and a kind of matching. *Adaptive Behavior* 9:67-91.
- Sharp, B. R., and R. J. Whittaker. 2003. The irreversible cattle-driven transformation of a seasonally flooded Australian savanna. *Journal of Biogeography* 30:783-802.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. Livestock's long shadow, environmental issues and option. FAO, LEAD Initiative, Roma, Italia.
- Stuth, J., and G. E. Maraschin. 2000. Sustainable Management of Pasture and Rangelands. In: I. G. Lemaire [ed]. Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology. p. 339-354.
- Sullivan, S., and R. Rohde. 2002. On non-equilibrium in arid and semi-arid grazing systems. *Journal of Biogeography* 29:1595-1618.
- Thompson, P. B., and A. Nardone. 1999. Sustainable livestock production: methodological and ethical challenges. *Livestock Production Science* 61:111-119.
- Topping, C. J., T. S. Hansen, T. S. Jensen, J. U. Jepsen, F. Nikolajsen, and P. Odderskær. 2003. ALMaSS, an agent-based model for animals in temperate European landscapes. *Ecological Modelling* 167:65-82.
- Toutain, B., D. Dulieu, H. Kagone, A. Paris, and A. Convers. 2003. Wildlife reserves and pastoralism in tropical Africa : multiple use or competition for resources ? The case of transhumance around the regional park of W. In: VII th International Rangeland Congress, Durban, South Africa.
- Ungar, E. D. 1996. Ingestive Behaviour. In: J. Hodgson and A. W. Illius [eds]. The Ecology and Management of Grazing Systems. CAB International, Wallingford, UK. p. 185-218.
- van Langevelde, F., M. Drescher, I. M. A. Heitkonig, and H. H. T. Prins. 2008. Instantaneous intake rate of herbivores as function of forage quality and mass: effects on facilitative and competitive interactions. *Ecological Modelling* 213:273-284.
- Walliser, B. 1977. Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes. Editions du Seuil [eds], Paris, France.
- Weber, G. E., K. Moloney, and F. Jeltsch. 2000. Simulated long-term vegetation response to alternative stocking strategies in savanna rangelands. *Plant Ecology* 150:77-96.

- Westoby, M., B. Walker, and I. Noy-Meir. 1989. Opportunistic management for rangelands not at equilibrium. *Journal of Range Management* 42:266-274.
- Yonkeu, S. 1991. Evolution d'un écosystème sous l'effet d'une forte charge animale dans la région de l'Adamaoua au Cameroun. *In*: A. Gaston, M. Kernick, and H.-N. Le Houérou [eds]. Actes du quatrième congrès international des terres de parcours. Proceedings of the fourth international rangeland congress. CIRAD, Montpellier, France. p. 186-188.

Annexes

73, allée Antoine Coysevox
Rés. Louisiane A 34080 Montpellier
Port. : (33)(0)6 75 40 10 94
Mail : chirat@supagro.inra.fr
27 ans, Permis B

Doctorant Pastoraliste Ingénieur Agronome

modèle spatial – choix alimentaires – territoire agropastoral

Des expériences formatrices

- Jan 07 – Jan 2009 **Modélisation des interactions troupeaux bovins – végétation en zones sèches**
Thèse de doctorat CIRAD PERSYST– INRA PHASE (Montpellier)
→ Gestion de **projet**, gestion d'une **équipe**, **traitements de données** / études **bibliographiques**, formalisation **UML**, **programmation orientée-objet**, rédaction scientifique et technique
Vacations : TP de biologie végétale L1 à l'Université Montpellier 2, cours de modélisation appliquée à l'élevage M2 à Montpellier SupAgro
- Avr 06 – Sep 2006 **Description et analyse d'un modèle SMA** à objectifs informatiques, interactions troupeaux bovins - végétation sur pâturages sahéliens, Sénégal
Mémoire de fin d'études, PPZS/IRD Dakar/CIRAD EMVT/INRA/ AGRO.M
→ **Applications JAVA / UML**, suivis de troupeaux bovins en libre pâture
- Fév 06 – Mar 2006 **Facteurs explicatifs et enjeux de l'évolution de l'élevage pastoral**, P.O. (66), France
Etude commanditée par le SUAMME (ex SIME)
→ **Enquêtes** éleveurs/OPA, **diagnostic**
- Mai 05 – Jul 2005 **Etude qualitative à direx d'acteurs des pratiques pastorales**, zone du projet de réserve naturelle, Nabek, Syrie. Rapport d'étape valorisé en 2007.
Etude commanditée par les ingénieurs agronomes d'une structure locale
→ **Enquêtes**, **typologie** des pratiques, **diagnostic**.
- Mai 04 – Déc 2004 **Etat des lieux de la filière porc, scénarii prospectifs** dans un but de développement, Ardèche (07), France
Etude commanditée par la Chambre d'Agriculture de l'Ardèche
→ **Synthèse de filière**, conduite de projet, **restitutions** écrites, **orales** et **concertation**
- Sep 03 – fin 2005 **Projet d'adduction d'eau**, Diohine, région de Fatick, Sénégal
Membre actif Ingénieurs Sans Frontières (ISF) Montpellier
→ Sur Montpellier : **suivi de projet**, démarches administratives, organisations de manifestations, **passation** de projet
→ Participation personnelle à la mission été 2004: **formalisation** et **contractualisation** du **réseau d'acteurs**, concertation, relevés **topographiques** et **GPS**

Une culture d'ingénieur généraliste axée vers l'élevage

- Zootecnie Reproduction, alimentation-nutrition des ruminants et des monogastriques
- Pastoralisme Expérience de divers systèmes d'élevage pastoraux. Evaluation de la durabilité
- Cadres d'élevage Analyse systémique d'exploitations. Organisation de filières. Gestion des paysages. PAC
- Outils informatiques Maîtrise des outils Office. Manipulation des SIG (MapInfo). Large utilisation de R (tableaux, graphiques, statistiques). Programmation SmallTalk (Cormas)
- Langues Anglais : courant (+ notions d'Allemand + rudiments d'Arabe, de Wolof et Peul)

Une formation d'ingénieur généraliste AGRO

- 2003 – 2006 Cycle ingénieur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier (AGRO.M). Spécialisation Elevage en Milieu Difficile, en partie commune avec le Master M II Productions Animales en Régions Chaudes (CIRAD).
Membre actif (1 an) Bureau des Elèves, lien sponsor BNP Paris Bas

Mes centres d'intérêt et investissements personnels

- Musique Pratique de la clarinette, groupe l'Oustal (www.myspace.com/l39oustal)
- Développement Intérêt pour les enjeux et projets de développement rural (Nord et Sud) et pour le terrain.

Articles soumis dans des revues à comité de lecture : -----

Chirat G., Ickowicz A., Messad S., Bocquier F., submitted. **Feed Intake of Free-Ranging Cattle on Tropical Semi-arid Territories through Instantaneous and Daily Measurements.** Soumis à Rangeland Ecology & Management, décembre 2009.

Chirat G., Ickowicz A., Messad S., Bocquier F., submitted. **Modeling Free-Ranging Cattle Spatial Behavior in Sahel: Daily Circuits Description, Conceptualization and Validations.** Soumis à Rangeland Ecology & Management, septembre 2009.

Actes de congrès : -----

Della Rossa L., Chirat G., Bocquier F., Ickowicz A., 2009. **Ingestion de troupeaux bovins sur parcours sahéliens et soudaniens en saison sèche.** Rencontres Recherches Ruminants. Institut de l'élevage et INRA ed. (Paris, France), 16, p. 53.

Chirat G., Ickowicz A., Diaf H., Bocquier F., 2008. **Etude des facteurs clés du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur un territoire agrosylvopastoral tropical.** Rencontres Recherches Ruminants. Institut de l'élevage et INRA ed. (Paris, France), 15, pp. 327-330.¹

Chirat G., Bocquier F., Bousquet F., Ickowicz A., 2008. **Sustainability of semi-arid extensive livestock systems in Senegal : elements for modelling animal – plant interactions.** Multifonctionnal Grasslands in a Changing World (XXI IGC - VIII IRC). Organizing Committee ed. (Hohhot, China), p. 219.

Chirat G., Ickowicz A., Bocquier F., 2007. **Etape de modélisation des déplacements et des choix alimentaires de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours agropastoraux en Casamance (Sénégal).** Rencontres Recherches Ruminants. Institut de l'élevage et INRA ed. (Paris, France), 14, p 191.

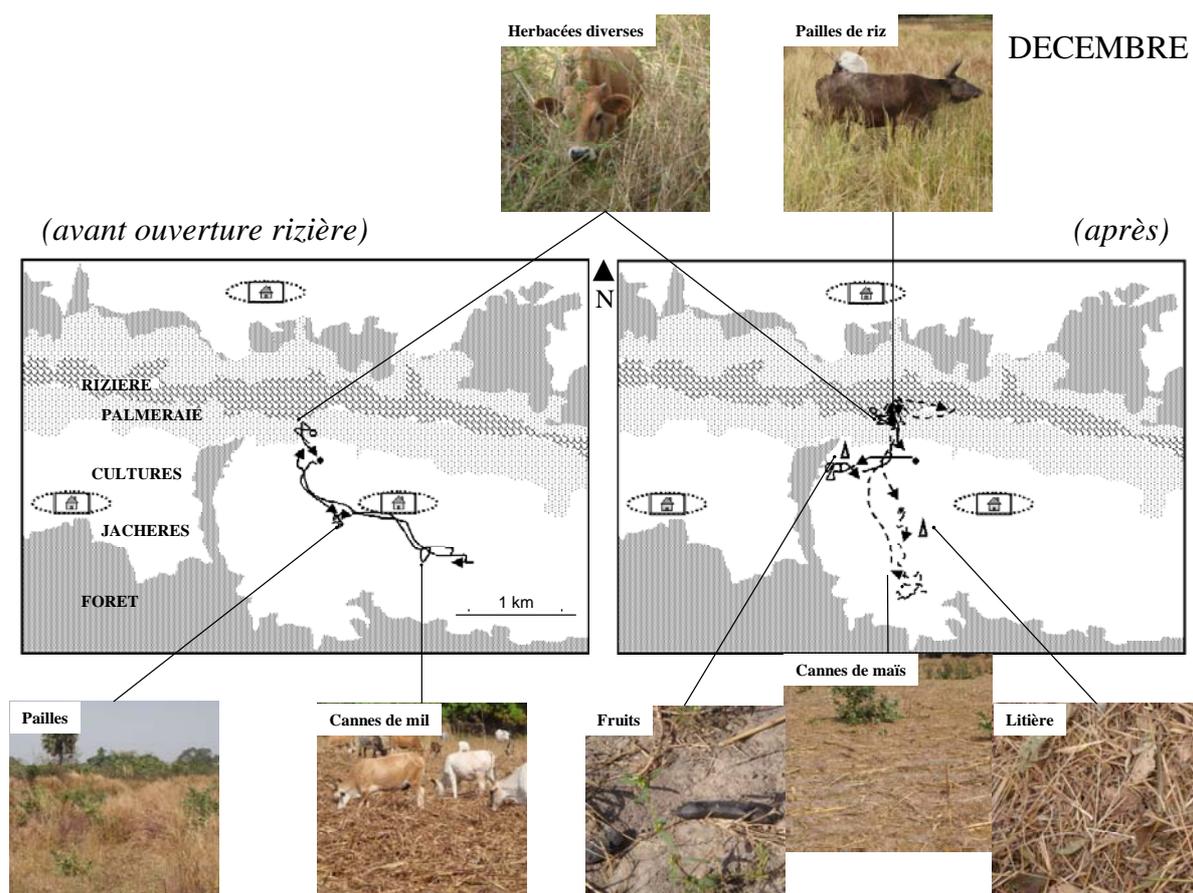
Mémoire de fin d'étude (Diplôme d'Agronomie Approfondie) : -----

Chirat G. et Cambier C. et Ickowicz A. et Bocquier F., 2006. **Contribution à l'analyse d'un modèle S.M.A. de comportement d'un troupeau bovin sur parcours soudano-sahélien.** Conceptualisation du modèle, analyse de fonctions primitives et des circuits, perspectives. Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier (AGRO.M), 36 p.

¹ cf. Annexe 6

Annexe 3 : Zones de parcours étudiées

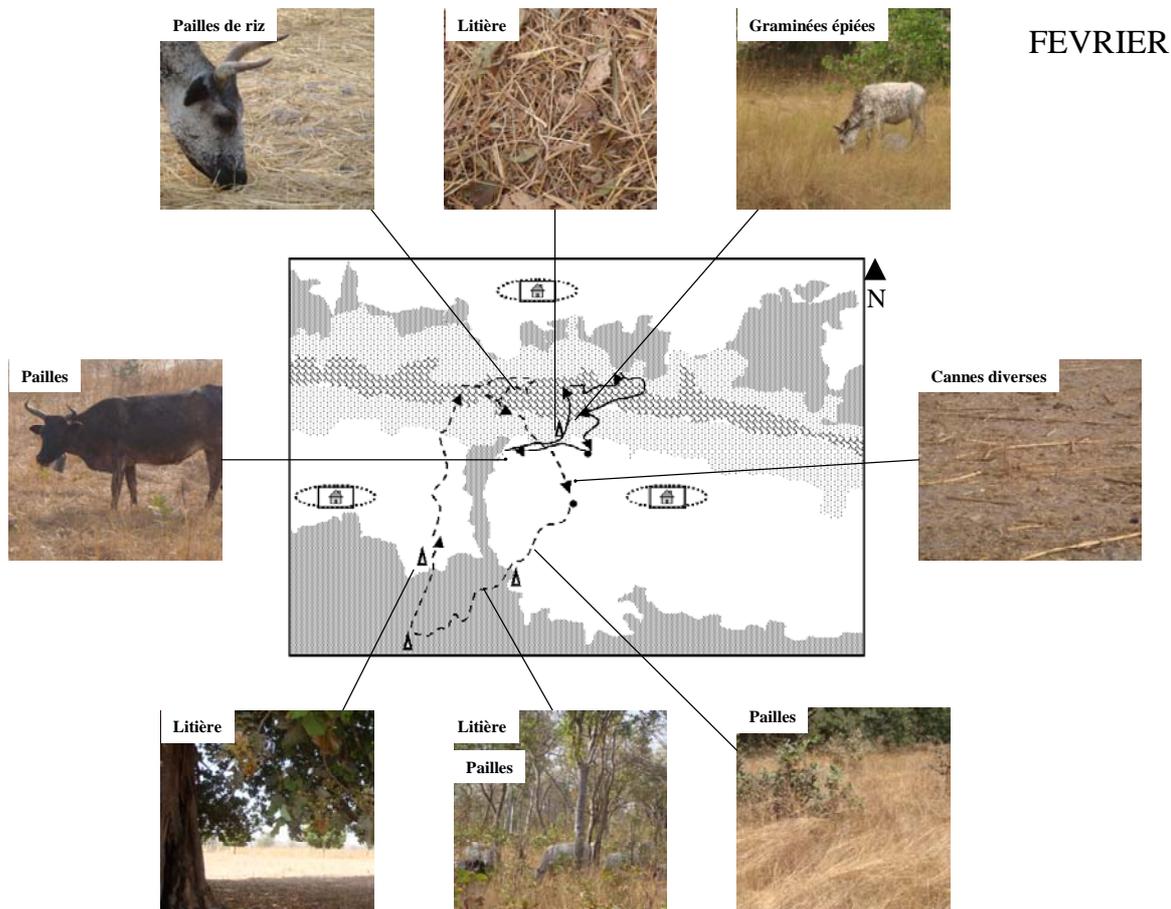
La région de Kolda, haute Casamance (sud Sénégal) est une terre agropastorale dans une zone sub-humide (terme plus ou moins équivalent à sub-aride, selon les classifications), sahélo-soudanienne. Les agro-éleveurs, majoritairement Peuls, sont organisés sur des terroirs villageois, qui englobent un finage cultivé, avec jachères, et des terres de parcours. Ils élèvent des taurins N'Dama.



En début de saison sèche (cf. décembre), les troupeaux sont contraints par un bouvier, qui oriente ses animaux vers différentes zones au cours de la journée, qu'il juge d'intérêt alimentaire. Il veille en outre à ce que le troupeau ne pénètre pas sur les parcelles non récoltées. Ce n'est qu'en fin de cette période que la rizière est ouverte progressivement aux animaux.

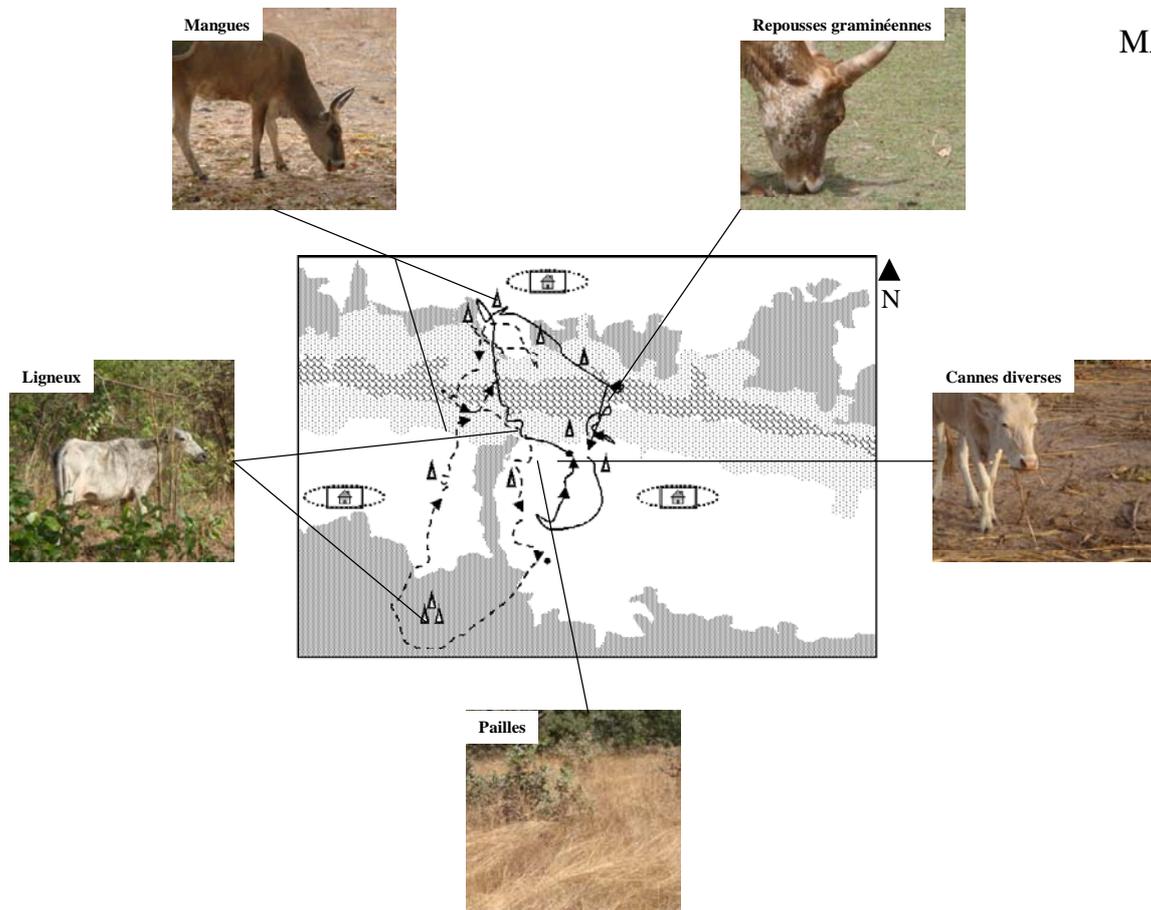
Dans cette région, les biomasses sont importantes en cette saison, qui suit les pluies. Les animaux exploitent principalement les résidus de récoltes sur le glacis cultivé : cannes de petit mil mais aussi de maïs et de sorgho, herbacées diverses sur champs d'arachide et dans la palmeraie, et les pailles et litières sur jachères ou savane. Une fois la rizière ouverte à la pâture, les troupeaux passent de plus en plus de temps dans les bas-fonds, à consommer les pailles à peine sèches résiduelles de riz.

Les grands troupeaux (circuit pointillé, après ouverture de la rizière) sont plus éloignés de la rizière que les petits troupeaux.



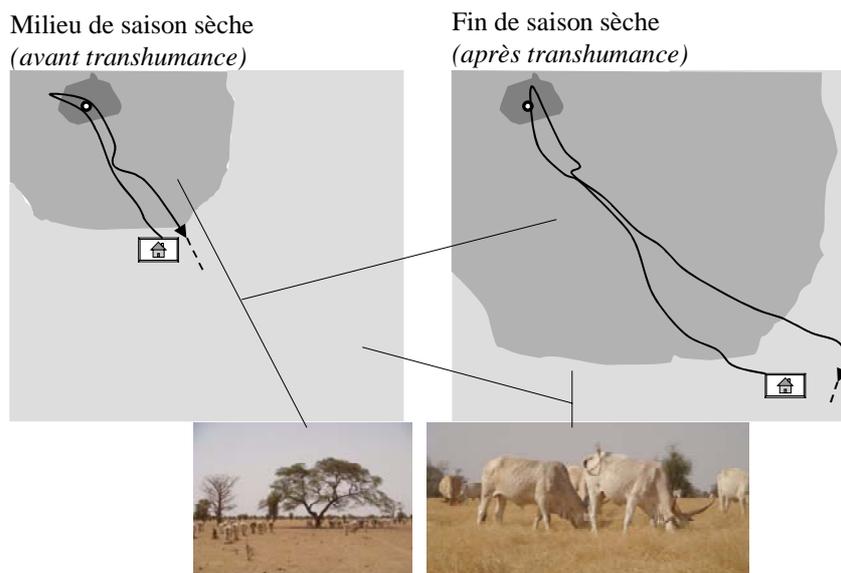
En milieu de saison sèche (cf. février), c'est la vaine pâture : les animaux parcourent librement le terroir villageois. Les grands troupeaux sont dans l'ensemble parqués plus loin de la rizière que les petits troupeaux. Ils exploitent également déjà le parcours forestier. C'est sur la rizière que les animaux passent la plus grande partie de la journée de libre pâture, consommant les pailles de riz.

En fin de saison sèche (cf. mai), les biomasses sont largement plus faibles qu'en début de saison sèche. Les animaux exploitent une surface plus large de territoire. C'est la période du climax des mangues, très appétantes. Il reste encore des cannes de céréales sur le terroir qui, elles, ne sont plus appétantes. Les pailles de riz ont quasiment totalement disparues. Dans les bas-fonds, des graminées repoussent et sont consommées (difficilement). Les ligneux contribuent au régime des animaux, principalement pour les grands troupeaux, qui exploitent plus la forêt que les petits troupeaux.



MAI

Dans la région sahélienne de Dahra, le territoire est semi-aride. Les éleveurs sont majoritairement Peuls, et ils ne pratiquent pas l'agriculture. Les bovins sont des zébus Gobra (principalement), qui explorent en libre pâture les terres steppiques d'une savane arbustive. Le territoire est plus vaste qu'à Kolda, en partie du fait de l'éloignement du point d'eau : un forage collectif. Les éleveurs Peuls, dans le Ferlo, partagent le territoire avec des agro-éleveurs Serreer.



Seule la libre pâture de jour est représentée : il n'y a pas eu d'observations faites la nuit. Les unités de végétation sont schématisées à partir d'observations. C'est un gradient positif de biomasses herbacées depuis le forage (point) jusqu'après les campements. La disponibilité de la biomasse est particulièrement réduite en fin de saison sèche.

La base Alimentation du Bétail Tropical (ABT) est une collection d'observations menées dans les années 1990, sur le comportement alimentaire des bovins N'Dama dans la région sahélo-soudanienne de Kolda (sud du Sénégal). Les catégories d'observations sont principalement (1) les quantités de fèces excrétées et leur composition chimique, (2) les compositions botaniques des régimes des animaux sur parcours, estimés par la méthode de la Collecte du berger, et (3) les carrières et les performances zootechniques d'animaux.

Suivi des troupeaux au pâturage - [Suivi des troupeaux au pâturage dans la région de Kolda, Basse Casamance]

Fichier Menu général Zones d'étude Acteurs Activités observées Suivi zootechnique Lexique des plantes Nomenclatures ? Quitter Adobe PDF

Projet de recherche ABT

"Alimentation du Bétail Tropical"
CIRAD/EMVT - ISRA/LNERV



Le suivi des troupeaux au pâturage a permis de réaliser des études sur :

- Les temps de parcours
- Les activités au parc
- Les activités sur parcours

Fermer

Suivi des troupeaux au pâturage - []

Fichier Menu général Zones d'étude Acteurs Activités observées Suivi zootechnique Lexique des plantes Nomenclatures ? Quitter Adobe PDF

Quantité de fèces excrétée

exprimée en grammes

Période du : 07/01/1997 au : 27/03/1998 Code du troupeau : (Tous) Sexe : (Tous)

Numéro de boucle de l'animal :	Code du troupeau :	Sexe de l'animal :	Date de la mesure :	Poids métabolique (kg) :	Qté excrétée le jour (g) :	Qté excrétée la nuit (g) :
1985	SNKOPMAMO	M	06/01/1998	54	1139	1352
1451	SNKOPMAMO	M	06/01/1998	58	1054	1421
1451	SNKOPMAMO	M	08/01/1998	58	765	815
1068	SNKOPMAMO	M	08/01/1998	67	1232	1725
1985	SNKOPMAMO	M	08/01/1998	54	1304	1204
1472	SNKOPMAMO	M	08/01/1998	44	640	1185
1542	SNKOPMAMO	M	08/01/1998	44	860	901
1451	SNKOPMAMO	M	09/01/1998	58	786	1186
1068	SNKOPMAMO	M	09/01/1998	67	1391	1944
1985	SNKOPMAMO	M	09/01/1998	54	1372	1920
1472	SNKOPMAMO	M	09/01/1998	44	605	1269
1542	SNKOPMAMO	M	09/01/1998	44	921	875
1630	SNKOPSALI	M	10/02/1998	52	575	1350
1291	SNKOPSALI	M	10/02/1998	51	1025	1008
1053	SNKOPSALI	M	10/02/1998	58	1150	725
1645	SNKOPSALI	M	10/02/1998	36	156	897
1671	SNKOPSALI	M	10/02/1998	39	660	812
1670	SNKOPSALI	M	10/02/1998	45	1150	928
1291	SNKOPSALI	M	11/02/1998	51	696	1485

Enr : 1 sur 914

Appliquer Exporter Imprimer Fermer



A partir d'un menu déroulant, l'utilisateur a accès à la catégorie souhaitée : par exemple, les quantités de fèces excrétées, mesurées par animal, identifié comme mâle ou femelle, appartenant à un éleveur donné. La date de la mesure est également indiquée. Cette partie nous a permis de travailler sur l'hypothèse de continuité de l'excrétion fécale sur 24h (cf. chapitre 1).

 UMR 868 Elevage des ruminants en régions chaudes 2 place Viala 34000 Montpellier	Protocole expérimental	Référence : PX-08-02
	Comportement spatial et mesure des quantités ingérées et des vitesses d'ingestion des bovins sur parcours agropastoral en Casamance et pastoral au Ferlo (Sénégal)	Version : 4
		date : 28/11/08
		page 1/ 10

Comportement spatial et mesure des quantités ingérées et des vitesses d'ingestion des bovins en libre pâture sur un terroir villageois agropastoral en Casamance et pastoral au Ferlo (Sénégal) en saison sèche selon les unités de végétation (savane, forêt, culture...)

Titre : Comportement spatial et mesure des quantités ingérées et des vitesses d'ingestion de bovins sur parcours agropastoral en Casamance et pastoral au Ferlo (Sénégal) en saison sèche
 N° de protocole : PX-08-02
 Mots clefs : *comportement spatial, quantités ingérées, vitesses d'ingestion, bovins, unités de végétation, saison sèche.*
 Période expérimentale : *du 01/02/2008 au 01/03/2009*
 Responsable de l'expérience : *Guillaume CHIRAT*

- 1/ Contexte scientifique, hypothèse et objectifs de travail
- 2/ Stratégie expérimentale
- 3/ Précautions particulières

REDACTEUR	DISCUSSION	VALIDATION
<i>Nom : Chirat G. Fonction : Doctorant Visa :</i>	<i>Discuté :</i> - <i>En équipe Le 30/04/2008</i> - <i>En conseil scientifique le/..</i>	
<i>DIFFUSION</i> - <i>Ickowicz A., Bocquier F. + stagiaires</i> - <i>Qualité</i>		<i>ARCHIVAGE :</i>

1/ Contexte scientifique, hypothèse et objectifs de travail

a) Introduction

Au Sud, les troupeaux bovins sont en vaine pâture pendant 8 mois environ de l'année, durant la saison sèche après les récoltes (Kennedy 1995, Ickowicz and Mbaye 2001). Les animaux sont de fait autonomes dans leurs déplacements. La complémentation alimentaire n'est pas courante. En pratique, les éleveurs ne peuvent guère influencer sur les parcours des bovins pour une exploitation dirigée des pâturages naturels, à l'échelle de territoires.

Notre question de recherche, qui découle de ce constat est la suivante : comment agir sur le comportement alimentaire des troupeaux bovins en libre pâture afin d'optimiser les productions animales et d'assurer une utilisation durable de la ressource ?

Notre hypothèse générale est qu'en jouant sur la position d'aménagements (parc de nuit, puits, mises en défens), il est possible d'orienter les animaux sur le territoire pour satisfaire aux objectifs ci-dessus.

b) Contexte et justification des besoins

Ce projet de thèse s'insère dans une problématique d'évaluation de la durabilité de territoires agropastoraux tropicaux, en termes de préservation de l'environnement et d'optimisation des productions (primaires et animales). En Afrique, les marges pastorales s'amenuisent par augmentation des surfaces emblavées (Steinfeld et al. 2006). Les résidus de cultures doivent être consommés par les troupeaux, ce qui permet à la fois un maintien de l'état des animaux et un apport organique (déjections) aux champs. Les circuits des troupeaux et les choix alimentaires sont importants à analyser. Cela doit permettre de comprendre les transferts de matière et d'énergie à l'échelle du territoire.

Nous travaillons à modéliser des troupeaux bovins en libre pâture. C'est un modèle des déplacements et des choix alimentaires spatialisés des bovins à travers de grandes unités de végétation composantes d'un territoire agropastoral tropical. C'est un modèle biologique, c'est-à-dire que nous intégrons un « noyau biologique » pour atteindre nos objectifs zootechniques, tout en observant le principe de parcimonie. Les vitesses d'ingestion des bovins sont la clé de voûte de ce « noyau biologique ». Nous ne disposons pas d'assez d'informations bibliographiques ou d'observations pour appliquer des règles pertinentes de vitesses d'ingestion. Nous avons donc à développer un protocole de mesure de ces paramètres.

Nous souhaitons suivre plusieurs bovins de différents troupeaux. Il s'agit de mesurer les quantités ingérées et les vitesses d'ingestion d'herbacées, ligneux et résidus de cultures par unité de végétation. Nous souhaitons aussi observer le comportement spatial des animaux au pâturage. L'étalement des périodes d'observation sur différentes saisons et le choix de différents sites d'étude (zone sahélo-soudanienne pour Kolda et zone sahélienne pour le Ferlo) ont été décidé dans le but d'une comparaison saisonnière (calibrage du modèle) et de zones sèches (portabilité du modèle).

c) Travaux antérieurs sur les vitesses d'ingestion, quantités ingérées et comportement spatial au pâturage

Il ne nous semble pas utile de répéter une analyse bibliographique des travaux pré-existant, sur les variables à mesurer. Pour cela, se référer aux travaux de thèse de Guillaume Chirat (INRA Phase, CIRAD Persyst, en études à Montpellier SupAgro), 2010.

- Vitesses d'ingestion

Notre zone d'étude porte différentes unités de végétation. Chaque unité ne permet clairement pas les mêmes vitesses d'ingestion (g MS / min). Ces vitesses dépendent principalement de la structure

de la végétation. La « préhensibilité » oriente en partie les choix alimentaires (Prache and Peyraud 1997, Delagarde and O'Donovan 2005, Benvenuti et al. 2009).

Il existe théoriquement, dans le cadre de la Réponse fonctionnelle, une relation asymptotique entre vitesses d'ingestion instantanées (VI) et biomasses disponibles (Bm), qui peut être modulée par d'autres caractéristiques des couverts, telles l'épinosité (Ungar 1996, Bergman et al. 2001, van Langevelde et al. 2008). Bergman et al. (2001) mais aussi van Langevelde et al. (2008) ont utilisé un ajustement de type Michaëlis et Menten :

$$VI = Bm \times \frac{VI \max}{Bm \times K} \quad [1]$$

Au Sénégal, H. Guérin a travaillé sur le comportement alimentaire des zébus. Ses prédécesseurs et lui ont montré la sélectivité des ruminants sur parcours et son évolution au cours d'une année. Ils n'ont pas travaillé sur les vitesses d'ingestion mais sur la composition des régimes et sur les quantités ingérées. H. Guérin applique la méthode de la Collecte du berger. Cette méthode demande à un observateur de surveiller pendant plusieurs secondes ou dizaines de secondes un ruminant en phase d'ingestion, jusqu'à ce qu'il avance pour continuer ses bouchées. L'observateur doit alors récolter la même poignée de végétation que l'animal vient d'ingérer. Cette méthode a un double inconvénient : l'observateur peut troubler les animaux et, en outre, il est source de biais des échantillons récoltés. Il ne semble pas y avoir de pas de temps standard d'observation. Dicko (1980) observait 4 animaux sur 1 minute tous les quarts d'heure, pendant 5 jours. Dicko et Sangare (1984) observaient 5 animaux sur 1 minute chaque quart d'heure, pendant 5 jours. Au ranch de Doli, les ruminants étaient suivis 3 fois par semaine au cours de séances de 30 minutes (1 à 2 observations par minute). Toutefois H. Guérin indique que sur parcours agropastoral contrasté, il est préférable de réduire les séances à 10 minutes, sur 2 ou 3 jours, afin de saisir l'hétérogénéité des faciès visités (Guérin 1987).

Cette méthode de Collecte du berger est intéressante pour observer les vitesses d'ingestion, vu nos conditions expérimentales : suivis à pieds de bovins en libre pâture. Il s'agira d'observer attentivement un animal sur une séquence d'une minute, puis de prélever à proximité, sur le même couvert, la quantité estimée.

- Quantités ingérées

En théorie, on estime qu'un bovin consomme par jour et par 100 kg de poids vif une quantité de fourrage ordinaire correspondant à 2,5 kg de matière sèche (soit 6,25 kg pour 1 U. B. T.). Cette norme semble surestimer la consommation des bovins sahéliens qui varie de 1,5 à 2,5 kg de matière sèche pour 100 kg de poids vif (Diop et al. 2005). Les mêmes auteurs précisent que les niveaux d'ingestion décroissent au cours de la saison sèche.

Les quantités ingérées par les ruminants tropicaux peuvent être estimées à partir des fèces, (1) en appliquant un coefficient de digestibilité et (2) en analysant un échantillon de fèces par les spectres proches infra-rouge (SPIR). La méthode (1) correspond à cette équation :

$$\text{Quantités Fèces totales} = \text{Quantités Ingérées} \times (1 - \text{Digestibilité}) \quad [2]$$

Des données existent dans la littérature sur la digestibilité moyenne de la matière organique des ressources du parcours (Ayantunde et al. 2001, Schlecht et al. 2007). Nous utiliserons celles de la base ABT (cf. Annexe 3). En outre, il faut pour (2) qu'il existe une base de référence qui lie les spectres avec des quantités ingérées préalablement calibrées. C'est le cas pour nos bovins tropicaux (Lecomte et al. 2003).

- Comportement spatial

Des études relatives au comportement alimentaire et spatial des bovins au pâturage ont mis en évidence que lorsque les herbivores exploitent des espaces vastes et très hétérogènes, ils utilisent

leur mémoire pour se diriger directement vers leurs sites alimentaires préférés. Cet apprentissage de la distribution spatiale des meilleures ressources est rapide chez les bovins (Bailey *et al.*, 1989). Ces derniers réagissent non seulement à la quantité de nourriture présente sur le site, mais aussi à sa qualité (Bailey & Sims, 1998). Mais les animaux ne réagissent pas qu'à la ressource fourragère. Les aménagements, tels le point d'eau et le parc de nuit, sont attracteurs et structurent les circuits des animaux (Bailey *et al.* 1996, Ganskopp 2001). De même, il existe des théories des déplacements d'individus, en recherche alimentaire, qui intègrent des règles d'économie, telle la théorie de l'Alimentation Optimale (Pyke 1984, Gross *et al.* 1995).

Le comportement spatial est une composante du processus de pâturage, il est dicté par la saison qui dicte l'accessibilité aux différents types de parcelles, par la biomasse végétale disponible et par les points d'eau (Manlay *et al.*, 2000). L'analyse des circuits montre une saisonnalité marquée du comportement alimentaire, même au sein de la saison sèche (Ickowicz *et al.* 1998).

2/ Stratégie expérimentale

a) Structure type des zones : variations spatio-temporelles du comportement alimentaire des bovins

Nous nous intéressons au finage villageois de Saré Yoro Bana, région de Kolda, Casamance, et au village de Widou Thiengoly, Ferlo, Sénégal. La première zone est agropastoral sahélo-soudanienne, et fut largement étudiée lors du programme ABT dans les années 1990. Le terroir est vallonné, constitué d'un plateau cuirassé, d'un glacis et de bas-fonds hydromorphes (Fig. 1). Le plateau porte une mosaïque de forêts claires et de savanes boisées, le glacis porte les jachères et les cultures pluviales semi-continues ou continues (céréales et arachide principalement). Dans les bas-fonds se trouvent les rizières. Le village de Widou Thiengoly est dans la seconde zone d'étude, pastorale et sahélienne, région du Ferlo sableux, terre aride et pauvre. Les paysages sont de type steppe et savane arbustive avec une couverture herbacée et ligneuse lâche particulièrement autour des forages. L'utilisation pastorale du Ferlo dépend des possibilités d'abreuvement des animaux.

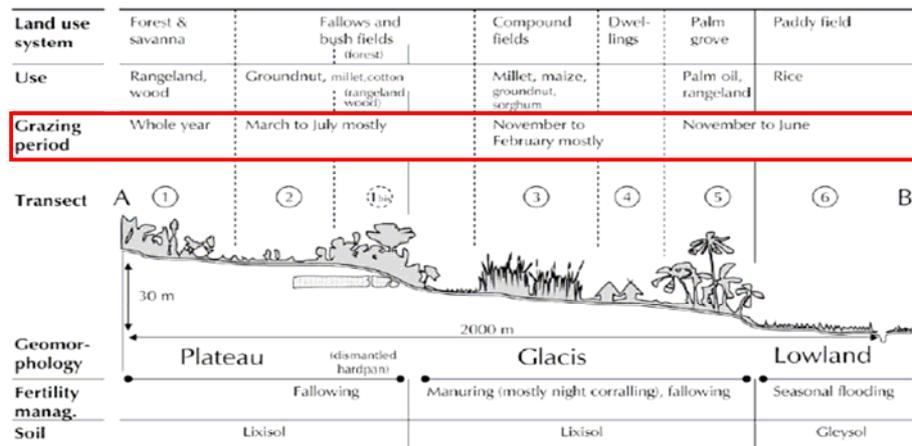


Figure 1. Schéma du terroir villageois de Saré Yoro Bana vu en coupe. Ce terroir agropastoral soudano-sahélien est caractérisé par son paysage vallonné, avec une mosaïque de forêt et savane sur le plateau, de savane et de cultures sur le glacis et les rizières dans le bas fonds, bordé d'une palmeraie. Les sols du plateau sont profonds, sableux, sur démantèlement de cuirasse (Frontier *et al.* 2004). Les sols du glacis sont aussi sableux, de moins en moins profonds jusqu'aux sols hydromorphes et argileux des bas fonds (Manlay *et al.* 2004).

L'objectif des missions est d'augmenter les informations sur les circuits des troupeaux bovins en libre pâturage, pendant la saison sèche. C'est surtout la création de connaissances sur les vitesses d'ingestion, et les interactions avec la nature des couverts consommés. Cela doit

permettre de spatialiser les choix alimentaires des troupeaux sur le territoire hétérogène, dans un modèle individu centré. Le territoire est donc découpé en grandes unités de végétation (jachère, forêt, rizière, champ de mil...), elles-mêmes découpées en patches ou sites alimentaires, pouvant porter différents types de végétation (ligneux, herbacées, résidus de cultures).

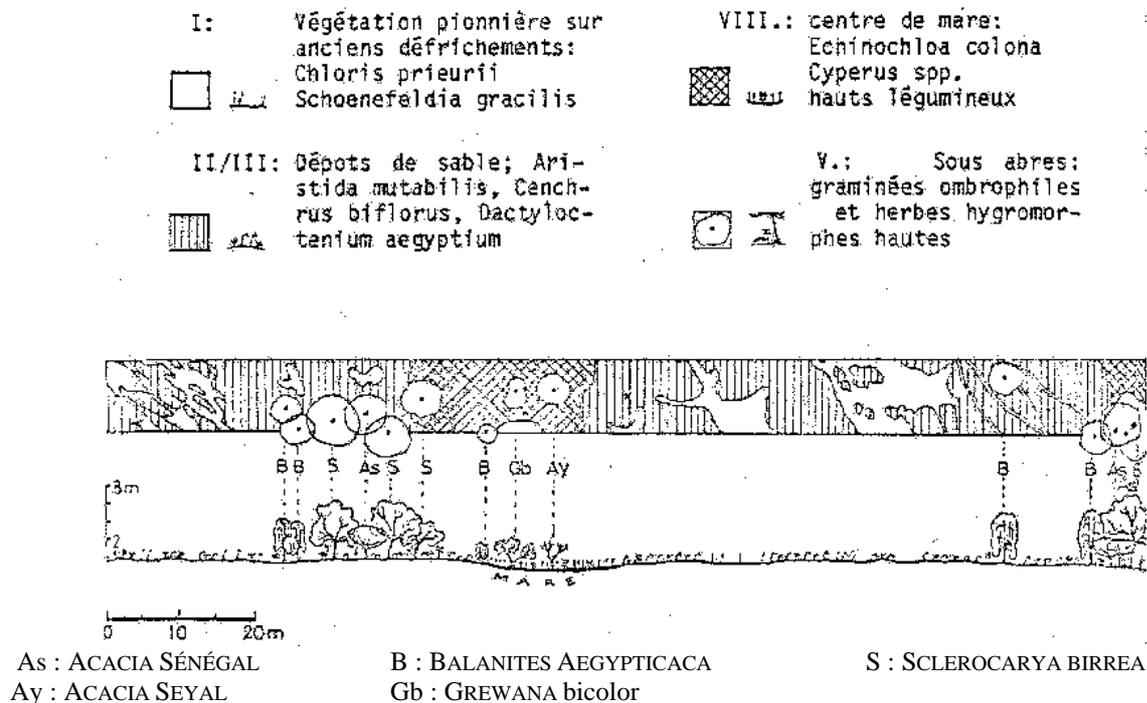


Figure 2. Schéma du territoire villageois de Widou Thiengoly vu en coupe. Profil de végétation, vues verticale et horizontale d'un transect à travers un site expérimental d'une parcelle d'élevage dans les environs du terroir villageois.

b) Stratégie sur le terrain

Nous nous intéressons à la saison sèche. Les suivis ont lieu en février 2008 (milieu de saison sèche), mai 2008 (fin de saison sèche) et décembre 2008 (début de saison sèche) à Kolda. Deux autres campagnes de terrain sont menées au Ferlo : mai – juin 2008, et février 2009, pour compléter les données au nord Sénégal durant la saison sèche.

Méthode prospective

- Déterminer le nombre de troupeaux considérés et le nombre d'animaux suivis.

Nombre de troupeaux : 2. Justification : y a-t-il une différence de vitesses d'ingestion selon la taille du troupeau ? En outre, nous préférons 2 troupeaux au lieu de 3 ou plus pour disposer du plus de répétitions possibles par troupeaux, sous contrainte de la courte période d'observation.

Nombre d'animaux suivis : 4 catégories / troupeau. Justification : y a-t-il une différence de vitesses d'ingestion selon différentes catégories d'animaux.

Définition des catégories : nous considérons la hauteur au garrot des vaches. Nous en tirons 2 catégories, « - » et « + ». Chaque catégorie sera subdivisée en 2 selon que les vaches sont pleines ou vides.

La détermination est faite le premier soir au parc de nuit, pour la zone casamançaise. Plusieurs animaux d'une même catégorie sont marqués au crayon gras. Pour le Ferlo, idem.

- Suivre les troupeaux.

Les suivis consistent à être présent du départ au retour au parc, que ce soit pour passer la nuit (Kolda) ou simplement pour l'allaitement des veaux avant un pâturage nocturne complémentaire (Ferlo). Il faut ensuite rapatrier les échantillons de végétation et de fèces au laboratoire pour le séchage à l'étuve. Les sacs en tissus de stockage de la végétation au cours de la journée de suivis sont en nombre limité. De même pour les bacs de l'étuve (ainsi que la taille de l'étuve). Il est donc important de mettre à sécher le soir même les échantillons et de les traiter le lendemain dans la mesure où il n'y a pas eu de coupures de courant.

Un technicien de laboratoire est donc astreint à cette tâche. Nous restons 2 sur le terrain, un observateur et un aide pour récolter les biomasses au placeau. Les animaux sont extrêmement mobiles, particulièrement en début et fin de journées, où les observations en continue sur 10 minutes sont délicates. En outre, aux heures les plus chaudes de la journée, chaleur et poussière influent sur la pénibilité du travail.

Chaque troupeau est suivi au moins 5 fois (10 jours de suivis). L'heure de départ est enregistrée. Chaque instant d'entrée et de sortie d'une unité de végétation par la majorité du groupe d'animaux considéré est enregistré. De même, chaque changement par la majorité du groupe d'animaux de « grande activité », i.e. pâturage en déplacement (noté P), déplacement simple (noté D) et repos (dont rumination, allaitement et abreuvement, noté R) est précisément relevé. Lors des phases de pâturage en déplacement, chaque fois qu'un animal marqué est visible sur une période d'au moins 5 min, une séquence d'observation est enclenchée. Il s'agit de déterminer sur 2 minutes les temps où l'animal ingère ou n'ingère pas (car il y a toute une gamme de comportements au sein du pâturage en déplacement). Ensuite, 1 minute est nécessaire pour le comptage des bouchées. Les répétitions de ces comptages sont appréciées, une à deux fois selon la faisabilité. Encore une minute est nécessaire pour estimer au mieux ce que l'animal ingère sur une minute. On peut alors réaliser une séquence vidéo sur 1 minute.

- Collecter les fèces au parc de nuit.

Connaissant les proportions du temps sur parcours et du temps au parc, nous nous restreindrons à collecter les fèces du parc de nuit. Nous en mesurerons les quantités et les compositions. Cela doit permettre d'estimer les QI et les qualités des régimes. Cette collecte de fèces ne sera pas possible sur le site du Ferlo car les animaux ne sont pas attachés la nuit. Pour pallier cet inconvénient et afin d'estimer les quantités ingérées, nous nous rapporterons aux données bibliographiques traitants les QI et les qualités des régimes alimentaires des Zébus dans au Ferlo. Et nous collecterons aléatoirement des échantillons soumis au laboratoire de l'UR 18 (CIRAD) pour une analyse SPIR. De même, les fèces séchés au laboratoire à Kolda seront rapatriés à Montpellier pour une analyse SPIR.

- Analyser des échantillons (sacs issues de la collecte du berger).

Chaque sac sera pesé. Cela nous donnera l'estimation des vitesses d'ingestion. Nous déterminerons alors la proportion massique des différents types de végétation (graminées, herbacées diverses, ligneux...). Selon, les types de fourrages, une part de chaque catégorie de couverts consommés sera rapatrier pour analyse SPIR à Montpellier, afin de déterminer des caractéristiques de qualités des fourrages.

c) Détail logistique de la stratégie

La mission se déroule sur minimum 20 jours de terrain en plus de quelques jours à Dakar. Le premier jour de terrain permet (1) une prise de contact avec deux éleveurs dont les troupeaux seront suivis, (2) de repérer plusieurs animaux que l'on marquera selon 4 catégories et (3) de procéder à un repérage du terrain avec une lecture de paysage.

- (1) Il est évidemment obligatoire de travailler avec des éleveurs coopérant, afin de pouvoir au moins manipuler les animaux. Un « dédommagement » est prévu.
- (2) Chaque troupeau sera subdivisé par catégorie. Les animaux, selon leur format, seront classés en « - » ou « + », respectivement « petit format » ou « grand format ». Chaque catégorie sera elle-même subdivisée en deux, selon que les vaches soient pleines ou vides. Un code couleur permet de repérer la classe d'une vache visuellement. A chaque séquence d'observation, la classe de l'animal choisi est relevée.
- (3) La zone d'étude à Kolda est caractérisée en « B1 → 4 », « M1 → 4 », « H1 → 4 », « H », « C », « CC », « Riz », « J », identiquement à la nomenclature développée au cours du programme ABT. Pour la zone de Widou Thiengoly, nous pourrions utiliser la nomenclature présentée Figure 2.

Chacun des 2 troupeaux est suivi sur 2 jours consécutifs. Vu la rusticité des attaches possibles et le coût du GPS, l'observateur porte le GPS afin d'augmenter voir éventuellement d'actualiser nos données sur les circuits des troupeaux. Les journées se dérouleront ainsi. Dans la région de Kolda, le soir, au retour des animaux au parc de nuit, 3 individus de chaque catégorie (4 / troupeau) sont placés sur des bâches plastiques pour récupérer l'ensemble des fèces excrétées durant la nuit. Ce ne sera donc pas fait dans le Ferlo. Le matin, avant le lâcher des animaux, nous mesurons à l'aide d'un peson l'ensemble des masses fraîches totales récupérées, puis récupérerons un échantillon de chaque masse de fèces, pesé également. Ces 12 échantillons seront placés dans 12 sacs plastiques pour le transport vers l'étuve.

2 à 3 personnes partent alors suivre le troupeau. L'observateur indique précisément les changements d'unité de végétation (majorité du groupe d'animaux suivis).

En outre, l'observateur repère le plus souvent possible un animal marqué observable, en activité de pâturage en déplacement. Il indique sur sa feuille de route la catégorie de l'animal et l'unité de végétation. L'objectif est de compter le nombre de bouchées par minute ainsi que d'estimer les quantités ingérées instantanées sur une minute. L'estimation de ces quantités est faite par une variante de la méthode de la « collecte du berger ». Notre méthode n'a pas pu être normalisée. Dans certains cas, nous apprécions directement ce que l'animal semble ingérer, sans reproduire les bouchées. Nous procédons ainsi pour le pâturage sur pailles de riz par exemple. Dans d'autres cas, il est plus aisé de reproduire le nombre de bouchées comptées sur une minute. C'est ainsi sur des couverts ras ou pour les « coups de dents » sur certains végétaux comme le *Triumfetta rhomboidea*.

L'observation terminée, il « dérange » l'animal pour prélever la végétation. Chaque échantillon de végétation est alors mis dans un sac en tissu que l'observateur porte. Les sacs sont identifiables par un numéro (marqueur noir). La végétation de la séquence 1 est placée dans le sac numéroté 1, et ainsi de suite. L'observateur s'occupe aussi de mesurer les temps d'ingestion et de « non ingestion », sur des séquences de 2 minutes pour une question évidente de faisabilité (notamment lors des courtes séquences de pâturage en déplacement, surtout en début et fin de journée).

L'aide (seconde personne) suit l'observateur. Il s'occupe des relevés de biomasse sur le terroir. Il positionne 2 placeaux d'un quart de mètre carré à l'endroit représentant la station alimentaire observée et rase la végétation. La biomasse est collectée dans des sacs en tissus numérotés.

Une dernière personne, habituée des animaux suivis, est chargée de compter le nombre de déglutitions de l'animal suivi par l'observateur principal ou d'un autre animal, sur 5 minutes. L'observateur principal déterminera si l'animal concerné est « stable » ou non. La « stabilité » signifie que l'animal suivi a peu bougé et n'a pas eu d'interruptions d'ingestion supérieures à 10 secondes. L'appréciation de la déglutition nécessite une surveillance de la base de la gorge ou du côté droit du cou. Ce n'est pas une observation aisée. Afin de tester la relative fiabilité de la personne chargée du comptage, il faut d'abord faire des essais avec plusieurs observateurs en même temps, ne communiquant pas entre eux.

A la fin de la journée, le GPS est récupéré pour transférer les données sur ordinateur. Les animaux sélectionnés sont attachés sur les bâches plastiques. Il faut alors acheminer jusqu'au laboratoire les échantillons des collectes du berger (sacs tissus), des relevés de biomasse (sacs tissus) et de fèces (sacs plastiques réutilisables).

Au laboratoire, les échantillons sont mis à l'étuve pour le séchage. Le lendemain soir, ils sont scellés dans des sacs plastiques identifiés par étiquette.

3/ Précautions particulières

a) Concernant les échantillonnages :

- Les modalités d'identification des échantillons :

Le système d'identification sera fait par étiquettes portant la date du suivi, le numéro du troupeau, l'identifiant de la catégorie de l'animal et le numéro de la séquence. Cet identifiant complet renvoie à toutes les informations relevées.

- Les modalités de stockage et de conservation des échantillons collectés :

Pour assurer la traçabilité et la fiabilité des manip, il est important de définir pour chaque type d'échantillons :

- les conditions de conservation et de stockage
- la localisation
- la personne responsable
- la durée de stockage

Notice remise aux techniciens des centres d'accueil :

(1) Récupérer les échantillons secs de l'étuve. Placer 1 à 1 les échantillons dans 1 ou 2 sachets plastiques prévus à cet effet, selon le volume de végétation, en prenant soin de ne pas mettre de sable.

(2) A chaque fois, coller 1 étiquette en inscrivant la référence :

-Si « B » (biomasses) sur le bac → Date – N° Troupeau – Catégorie Animal – N° Relevé – BM

-Si « E » (vitesses d'ingestion) sur le bac → Date – N° Troupeau – Catégorie Animal – N° Relevé – VI

-Si échantillon de fèces → Date – N° Troupeau – Catégorie Animal – N° Animal – F

Remarque : il y a 4 catégories d'animaux, reportées en face de chaque séquence d'observation, chaque jour de suivi, sur une fiche à part. Les catégories sont : « Petite Vide » (PV), « Petite Pleine » (PP), « Grande Vide » (GV) et « Grande Pleine » (GP).

(3) Peser chaque échantillon au gramme près. Préparer un coupon où sont reportées les références de l'échantillon (idem étiquette). Noter sur le coupon la masse relevée et indiquer dans la mesure du possible les proportions massiques de résidus de cultures, graminées, légumineuses herbacées, herbacées diverses et ligneux ainsi que les espèces dominantes identifiables (maïs, *Pennisetum pedicellatum* ...).

(4) Exemple / Bilan : soit un échantillon « B10 » du 7 février 2008, pour une PV du troupeau 1, issu d'un relevé sur la rizière. Il faut donc indiquer sur l'étiquette auto-collante « 7/02/08 – 1 – PV – 10 – BM ». Sur le coupon àagrafer : « 7/02/08 – 1 – PV – 10 – BM » et « 128 g » (par exemple) et « pailles de riz 90 %, graminées 10 % » (par exemple).

Les échantillons sont tous en sachets plastiques, organisés au sein de grands sacs en plastique tressé, eux-mêmes entreposés au « magasin » du PPZS, à Dakar Hann.

- Les modalités d'envoi et de transport et de réception des échantillons

Pour déterminer les qualités de régimes par l'analyse des fèces, il est souhaitable de rapatrier le sac de stockage des échantillons de fèces sur Montpellier. Les fèces demeurent au magasin du PPZS. Les modalités d'envoi seront définies en temps voulu.

b) Concernant les enregistrements

L'observateur dispose d'une trame sur le terrain relativement lâche afin de pouvoir apporter le plus de commentaires possibles. En revanche, pour les masses (VI, Bm, fèces) mesurées quotidiennement, des grilles spécifiques sont à remplir. Toutes les données (comme les masses, les compositions botaniques des échantillons, les nombres de bouchées...) sont ensuite reportées sur tableur sur ordinateur pour les traitements statistiques.

c) Concernant les équipements

Concernant les sacs de stockage, les sachets plastiques sont suffisamment épais pour conserver les échantillons. Les sacs de plastique tressé n'ont pas de risque d'usure prématurée. Concernant les sacs carrés en tissus, ils mesurent 30 x 30 cm et sont refermables par étranglement du col. Le volume est suffisant pour une collecte de terrain (biomasse ou Collecte du berger). Parfois, si le sac est trop juste pour une zone à forte biomasse, l'aide utilise un sac sans numéro qu'il accroche au sac numéroté correspondant. Cette manœuvre est transitoire vu que la végétation est séchée le même jour.

Les pesées des masses fraîches totales des fèces par animal sélectionné sont faites à l'aide d'un peson borné à 50 kg (seul matériel disponible) qui ne permet pas en théorie de descendre à une précision inférieure à la centaine de grammes. Cela n'est pas problématique pour des masses devant normalement dépasser les 2000 g.

Les pesées des échantillons de fèces (masses fraîches) sont faites à l'aide d'un peson bornée à 1500 g. la précision est à la dizaine de grammes.

Toutes les pesées de matériel sec sont faites à l'aide d'une balance électronique avec une précision au gramme près. Cela est important pour les échantillons de végétation.

Sur le terrain, seul l'observateur peut mesurer avec précision les masses de fèces fraîches. Au laboratoire, c'est le technicien qui est chargé des mesures (échantillons frais de fèces et masses sèches).

Bibliographie

- Arnold G. W. & Maller R. A., 1977. Effects of nutritional experience in early and adult life on the performance and dietary habits of sheep. *Applied Animal Ethology*, 3, 5-26.
- Bailey D. W. & Sims P. L., 1998. Association of food quality and locations by cattle. *J. of Range Management*, 51, 2-8.
- Bailey D. W., Rittenhouse L. R., Hart R. H., Swift D. M. & Richards R. W., 1989. Association of relative food availabilities and locations by cattle. *J. of Range Management*, 42, 480-482.
- Decuq F., Brun J. P., Dubroeuq H., Thériez M. & Micol D., 1998. Adaptation des techniques GPS à l'étude de la localisation d'herbivores domestiques au pâturage. *Ann. Zootech.*, 47 : 321-333.
- Ayantunde, A. A., S. Fernandez-Rivera, P. Hiernaux, H. van Keulen, H. M. J. Udo, and M. Chanono. 2001. Effects of timing and duration of grazing of growing cattle in the West African Sahel on diet selection, faecal output, eating time, forage intake and live-weight changes. *Animal Science* 72:117-128.
- Bailey, D. W., J. E. Gross, E. A. Laca, L. R. Rittenhouse, M. B. Coughenour, D. M. Swift, and P. L. Sims. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management* 49:386-400.
- Benvenuti, M. A., I. J. Gordon, D. P. Poppi, R. Crowther, W. Spinks, and F. C. Moreno. 2009. The horizontal barrier effect of stems on the foraging behaviour of cattle grazing five tropical grasses. *Livestock Science* 126:229-238.
- Bergman, C. M., J. M. Fryxell, C. C. Gates, and D. Fortin. 2001. Ungulate foraging strategies: energy maximizing or time minimizing? *Journal of Animal Ecology* 70:289-300.

- Delagarde, R., and M. O'Donovan. 2005. Les modèles de prévision de l'ingestion journalière d'herbe et de la production laitière des vaches au pâturage. *INRA Productions Animales* 18:241-253.
- Diop, A. T., O. Touré, A. Ickowicz, and A. Diouf. 2005. Les ressources sylvopastorales. Pages 91-105 in *Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal 1964-2004*. ISRA, Dakar.
- Frontier, S., D. Pichod-Viale, A. Lepêtre, D. Davoult, and C. Luczak. 2004. *ÉCOSYSTÈMES, Structure, Fonctionnement, Évolution*. 2e cycle / Master – CAPES – Agrégation, 3è édition edition. Dunod, Paris.
- Ganskopp, D. 2001. Manipulating cattle distribution with salt and water in large arid-land pastures: a GPS/GIS assessment. *Applied Animal Behaviour Science* 73:251-262.
- Gross, J. E., C. Zank, N. T. Hobbs, and D. E. Spalinger. 1995. Movement rules for herbivores in spatially heterogeneous environments: responses to small scale pattern. *Landscape Ecology* 10:209-217.
- Guérin, H. 1987. Alimentation des ruminants domestiques sur pâturages naturels sahéliens et sahélo-soudaniens : étude méthodologique dans la région du Ferlo au Sénégal. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, Montpellier.
- Ickowicz, A., and M. Mbaye. 2001. Forêts soudanaises et alimentation des bovins au Sénégal : potentiel et limites. *Bois et forêts des tropiques* 270:47-61.
- Ickowicz, A., J. Usengumurenyi, D. Richard, F. Colleie, and D. Dupressoir. 1998. Interactions entre jachère et systèmes d'alimentation des bovins. Choix techniques et dynamique de développement (zone soudanienne, Sénégal). in C. Floret and R. Pontanier, editors. *Actes de l'Atelier Jachères et Systèmes agraires, Niamey (Niger)*.
- Kennedy, P. M. 1995. Comparative adaptability of herbivores to tropical environnements. Pages 309-328 in M. Journet, E. Grenet, M.-H. Farce, M. Thériez, and C. Demarquilly, editors. *Recent Developments in the nutrition of herbivores - Proceedings of the IVth International Symposium on the Nutrition of Herbivores, Clermont-Ferrand (France)*. INRA, Paris.
- Lecomte, P., F. Safietou, D. Friot, D. Richard, A. Ickowicz, H. Guérin, and L. Bonnal. 2003. Calibrating in vivo feeding value parameters on faeces NIRs spectral data's. Case of rations fed to tropical ruminants (Senegal). Pages 171 in *Institut de l'élevage and INRA, editors. Rencontres Recherches Ruminants, Paris, France*.
- Manlay, R. J., A. Ickowicz, D. Masse, C. Floret, D. Richard, and C. Feller. 2004. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna--I. Element pools and structure of a mixed-farming system. *Agricultural Systems* 79:55-81.
- Prache, S., and J.-L. Peyraud. 1997. Préhensibilité de l'herbe pâturée chez les bovins et les ovins. *INRA Prod. Anim.* 10:377-390.
- Pyke, G. H. 1984. Optimal Foraging Theory: A Critical Review. *Annual Review of Ecology and Systematics* 15:523-575.
- Schlecht, E., H. Richter, S. Fernandez-Rivera, and K. Becker. 2007. Gastrointestinal passage of Sahelian roughages in cattle, sheep and goats, and implications for livestock-mediated nutrient transfers. *Animal Feed Science and Technology* 137 93-114.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. *Livestock's long shadow, environmental issues and option*. FAO, LEAD Initiative, Rome.
- Ungar, E. D. 1996. Ingestive Behaviour. Pages 185-218 in J. Hodgson and A. W. Illius, editors. *The Ecology and Management of Grazing Systems*. CAB International, Wallingford (UK).
- van Langevelde, F., M. Drescher, I. M. A. Heitkonig, and H. H. T. Prins. 2008. Instantaneous intake rate of herbivores as function of forage quality and mass: effects on facilitative and competitive interactions. *Ecological Modelling* 213:273-284.

Etude des facteurs clés du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur un territoire agrosylvopastoral tropical

CHIRAT G. (1), ICKOWICZ A. (1), DIAF H. (1), BOCQUIER F.(1)

(1) UMR Elevage des Ruminants en Régions Chaudes (INRA, CIRAD, Montpellier SupAgro), 2 place Viala, 34060 Montpellier

RESUME

Elevage et agriculture, pour l'autoconsommation et générateurs de revenus, sont intégrés au sein des sociétés agropastorales d'Afrique sub-saharienne. Dans les systèmes d'élevage divagant, les troupeaux exploitent en libre pâture les résidus de cultures en plus des marges sylvopastorales. Les animaux parcourent d'assez longues distances quotidiennement, sur une ressource disponible qualitativement pauvre et s'amenuisant avec l'avancée de la saison sèche. Régimes et niveaux d'ingestion déterminent les performances zootechniques, en lien direct avec les finances des familles d'agropasteurs. Les interactions entre troupeaux et ressources sont mal connues dans ces systèmes. Nous nous intéressons à l'évaluation de la durabilité de l'exploitation des ressources et des performances animales par l'étude du comportement spatial et alimentaire des troupeaux bovins. Nous avons d'une part décrit des facteurs des circuits quotidiens et, d'autre part, des variables alimentaires. Les circuits sont déterminés principalement par la position d'aménagements rattachés par les troupeaux : parcs, où les animaux sont attachés la nuit et points d'eau. Les circuits ont tendance à s'allonger avec l'avancement de la saison sèche, du fait notamment de la diminution des ressources disponibles. Les troupeaux sont en déplacement tout au long de la journée de parcours. Ils visitent différentes unités de végétation où nous avons estimé des vitesses d'ingestion : sur espèces herbacées, nous avançons un encadrement médian entre 45 et 50 g MS / min. Les vitesses d'ingestion semblent globalement liées aux biomasses disponibles et aux unités de végétation. On note enfin une chute des quantités ingérées avec l'avancée de la saison sèche, tombant sous les 4 kg MS / j avant les pluies. L'identification de ces facteurs doit permettre de tester via la modélisation l'impact d'aménagements sur les circuits, les performances animales et les transferts de fertilité sur le territoire.

Study of key factors of spatial and feeding behaviour of free grazing cattle herds on an agrosylvopastoral tropical territory

CHIRAT G. (1), ICKOWICZ A. (1), DIAF H. (1), BOCQUIER F.(1)

(1) UMR Elevage des Ruminants en Régions Chaudes (INRA, CIRAD, Montpellier SupAgro), 2 place Viala, 34060 Montpellier

SUMMARY

Breeding and agriculture, for autoconsumption and income, are integrated in agropastoral societies of sub-saharian Africa. In free grazing breeding systems, herds use free crop residues besides spontaneous range resources. Cattle cover quite long distances daily, on a poor-qualitative available resource that reduces, the dry season passing. Diet and intake level set the zootechnical performances that are directly bound with the purchasing power of breeders' families. Interactions between herds and resources are misunderstood in these systems. We are interested in evaluating the resources use sustainability and the animal performances by studying spatial and feeding behaviours of cattle. We described on the one hand factors of the daily circuits and on the other hand, some feeding variables. Circuits are structured mainly by the location of some works that are rejoined by herds : parcs where cattle are tied up at night, and water points. Circuits tend to get longer while the dry season passing. That is due mainly to the available resources decreasing. Cattle herds are moving all the circuit time long. They look round some vegetation units where we estimated instantaneous intake rates : on herbaceous species, we found a median range between 45 and 50 g DM / min. Instantaneous intake rates look roughly correlated to available biomasses and type of vegetation. We finally note a collapse of daily intake rates during the dry season, falling under 4 kg DM / day before the rainy season. All of those factors identification must allow to test through modelling works impacts on circuits, on animal performances and on soil fertility transfers.

INTRODUCTION

Une analyse de la FAO souligne la productivité insuffisante des systèmes pastoraux pour répondre à la demande alimentaire mondiale et leurs impacts environnementaux négatifs sur les sols et l'atmosphère (Steinfeld *et al.*, 2006). Pourtant l'élevage extensif reste une clé de voûte des activités des populations rurales en Afrique sub-saharienne par ses fonctions économique, écologique (transfert de matière organique) et sociale. Nous cherchons à comprendre comment influencer sur les déplacements et choix alimentaires de troupeaux bovins en libre pâture pour optimiser leurs impacts environnementaux et zootechniques sur un territoire agropastoral en zones sèches, ceci à partir d'aménagements des parcours (puits, parc de nuit, haies, banques fourragères). Nous faisons l'hypothèse que nous y parviendrons en nous appuyant sur la modélisation spatialisée du comportement alimentaire d'un troupeau bovin en libre pâture. Cela passe par la description fonctionnelle du système d'élevage : nous présentons ici

nos principaux résultats sur le comportement spatial et alimentaire des troupeaux.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. ZONE D'ETUDE

Le territoire d'élevage extensif, dans la région de Kolda (sud Sénégal), est une succession de finages villageois séparés par des cordons forestiers ou les bas fonds où se situent les rizières. En saison sèche (SS : fin octobre à fin mai), les troupeaux sont attachés la nuit (parc) sur les champs pour le fumage. Ils sont lâchés en libre pâture le matin après la traite. Pendant la saison des pluies, les animaux sont gardés et parqués en forêt, éloignés des cultures.

Nous disposons de 5 années d'observations des circuits journaliers, de l'alimentation ainsi que des performances zootechniques des bovins sur cette zone d'étude, issues du programme Alimentation du Bétail Tropical (ABT) (Ickowicz et Mbaye, 2001).

1.2. APPROCHE

En plus de l'utilisation des données ABT, nous avons procédé à des observations complémentaires en termes de description des circuits et de prélèvements par les animaux (quantités ingérées QI, vitesses d'ingestion VI).

Notre méthode consiste à suivre sur plusieurs jours consécutifs deux troupeaux en divagation sur le territoire villageois, ce à trois périodes de la SS, marquées par la différence de ressources. Il y a un troupeau à petit effectif (une vingtaine de femelles) et un à gros effectif (une soixantaine de femelles). Au sein de ces troupeaux, nous distinguons les femelles par les critères de format (petites ou grandes) et stade (gestantes ou vides). Troupeaux et catégories sont distingués pour cerner d'éventuels effets sur les variables alimentaires et sur les circuits.

Ces suivis journaliers permettent d'enregistrer en continu les circuits, avec les unités de végétation fréquentées, les activités majoritaires des animaux suivis (pâturage – déplacement, déplacement, repos), les heures de passages aux aménagements (point d'eau et parc de nuit).

En outre, nous avons estimé les QI par collecte des fèces de la nuit en les récupérant sur bâche aux parcs. Nous avons supposé, comme Manlay *et al.*, 2004 (même zone d'étude), que l'excrétion est continue.

Nous avons estimé les VI par observations directes des vaches en divagation. Nous avons adapté la méthode de la Collecte du berger, développée par Guérin, 1987. Il s'agit de mimer la quantité prélevée par une femelle sur 1 min. Ces quantités sont séchées et pesées, exprimées en g de matière sèche (MS) par min. Nous avons aussi enregistré la fréquence des bouchées.

2. RESULTATS

2.1. DESCRIPTEURS DES CIRCUITS

2.1.1. Conséquences des aménagements sur les circuits

Les aménagements actuels sont les puits et les parcs. Ils sont des points de passage obligatoires, qui structurent spatialement les circuits. Une étude de modélisation antérieure appuie ce constat. Nous avons montré, dans le cadre d'une validation de circuits simulés par différentes règles de déplacement plus ou moins complexes, qu'une seule fonction « mécanique » de focalisation des troupeaux vers ces points de passage, avec contrainte de temps, a plus de sens qu'un panel de règles tenant compte des caractéristiques des biomasses (BM) fréquentées. Ce modèle préliminaire reste imparfait sur les aspects biologiques (Chirat *et al.*, 2007), mais les formes de circuits, les horaires de passage au point d'eau et les temps de parcours étaient conformes.

2.1.2. Temps de parcours quotidiens

Les circuits doivent être décrits par des variables d'état pertinentes. Nous nous sommes intéressés à l'évolution des temps de parcours au cours de l'année (Figure 1) sur 3 campagnes de mesures ABT.

Figure 1, les temps de parcours sont prédit par un modèle linéaire (degré 4), robuste (effets troupeau et année : ns).

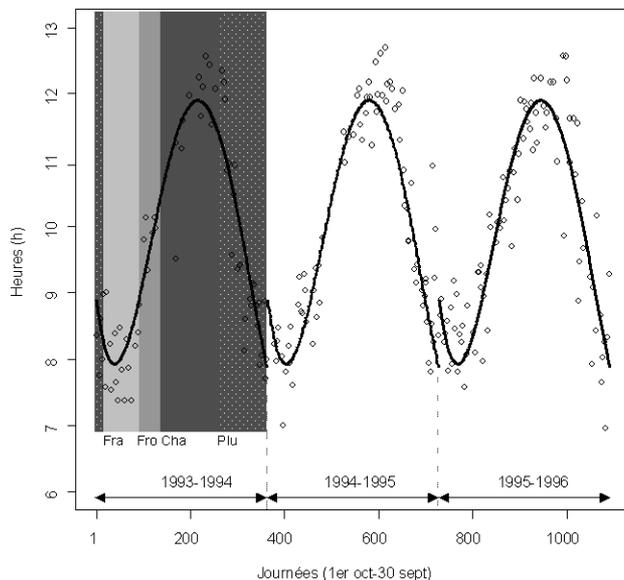


Figure 1 Valeurs prédites (courbe) et valeurs enregistrées des temps de parcours quotidiens en fonction du jour de l'année ($n = 227$, $R^2 = 0,84$). L'amplitude durant la saison sèche (**Fra**îche, **Fro**ide et **Cha**ude), avant les **Plu**ies, est forte, environ 4 h.

En fait, les temps de parcours sont très corrélés ($R^2 = 0,94$) aux heures de départ, liées aux pratiques saisonnières de l'éleveur. En revanche, l'évolution de ces durées n'est pas expliquée par les heures d'attache (fin de journée). En effet, l'heure d'attache varie peu sur l'année, les éleveurs intervenant avant la tombée du jour (dont l'amplitude est faible également).

2.1.3. Distances quotidiennes parcourues

Sur l'année, la distance moyenne est $7,3 \pm 3,0$ km. La variabilité étant forte, il n'y a pas de modèles statistiques satisfaisants pour décrire les valeurs observées. Cette variabilité est en grande partie expliquée par les distances différentes séparant les parcs des puits selon les troupeaux. Les gros troupeaux sont parqués toujours plus loin des points d'eau que les petits. En outre, nous notons une tendance à l'allongement des circuits avec l'avancée de la saison sèche. Cette tendance est liée à la contrainte de diminution de la disponibilité des ressources. En 2008, nous avons un effet significatif de la saison ($p < 0,01$) : on passe de 4,2 et 6,3 à 7,5 et 9,6 km respectivement pour les petit et gros troupeaux entre février et mai.

2.1.4. Fréquentations des unités de végétation

A une saison donnée, la relative stabilité des temps de parcours et des distances quotidiennes est liée à la similitude des circuits (Figure 2). D'un troupeau à l'autre, les différences d'unités de végétation visitées s'expliquent par la position du parc, du point d'eau et par l'orientation initiale donnée par l'éleveur. D'une saison à l'autre, les différences sont liées à l'évolution des positions des parcs et points d'eau, et à la diminution progressive des ressources.

En SS froide (février), les troupeaux pâturent majoritairement sur la rizière. En SS chaude, les unités visitées sont plus nombreuses. Les troupeaux sont à la recherche d'une ressource plus rare.

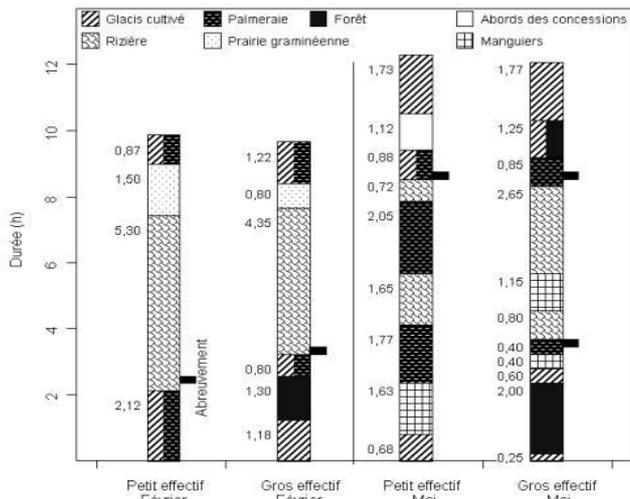


Figure 2 Temps moyen et séquences de fréquentation des unités de végétation (UV), région de Kolda, selon la taille du troupeau et la saison, saison sèche 2008. Deux UV représentées accolées indiquent une fréquentation à l'interface.

2.1.5. Activités des troupeaux

On distingue trois types d'activités sur parcours : le déplacement ($21 \pm 8\%$ du temps de parcours, en moyenne sur l'année), le repos ($9 \pm 7\%$) et l'activité majoritaire, le pâturage – déplacement ($70 \pm 7\%$). Le déplacement seul permet surtout de quitter une zone pour en rejoindre une autre. Les phases de repos varient au cours de l'année. Elles sont observées en fin de journée, avant l'attache, en SS froide, et entre 15:00 et 16:00 h en SS chaude du fait de la forte insolation. Les temps de repos sont significativement plus longs en SS chaude ($p < 0,001$). Nous avons noté en outre qu'il n'y a pas de rumination au cours de la journée de divagation. On peut penser que le temps conséquent d'attache (au moins 12 h par jour) et l'importance des déplacements pour assurer un certain niveau d'ingestion limitent le temps consacré à la rumination.

Comme il n'est pas possible de dissocier le pâturage du déplacement, nous qualifions ce système de « marcheur ». Les phases de pâturage – déplacement, très majoritaires, correspondent à une continuité de comportements depuis la « cueillette » (ex. : en forêt en SS chaude, les déplacements font plusieurs dizaines de mètres et les phases d'ingestion sont limitées à quelques secondes ou dizaines de secondes) jusqu'au « pâturage stable » (ex. : sur les résidus de cultures en SS fraîche et froide, les déplacements sont quasi nuls). Elles conditionnent l'ingestion.

2.2. COMPORTEMENT ALIMENTAIRE

2.2.1. Vitesses d'ingestion

Nous avons cherché à connaître les VI au cours des journées de parcours. En ajustant une relation entre VI et BM disponibles mesurées (lissage par loess et splines cubiques), nous dégagons une tendance asymptotique d'évolution des VI en fonction des BM, en accord avec le « mécanisme compensatoire », composante de la réponse fonctionnelle, cadre d'analyse théorique du comportement alimentaire (Hodgson, 1986 ; Ungar, 1996; Langevelde *et al.*, 2008). Nous avons alors appliqué des modèles de type Michaelis et Menten (Figure 3), dont l'équation est :

$VI = \frac{BM \times VI_{max}}{K + BM}$,
où VI max la VI à l'asymptote et K la BM pour laquelle VI est égale VI max / 2.

Le paramétrage selon une équation de type Michaelis et Menten a du sens biologique et est utilisée dans les

descriptions de réponse fonctionnelle (Bergman *et al.*, 2001 pour des bisons sur gazons artificiels ; Langevelde *et al.*, 2008 avec intégration de la qualité de la ressource dans la formalisation).

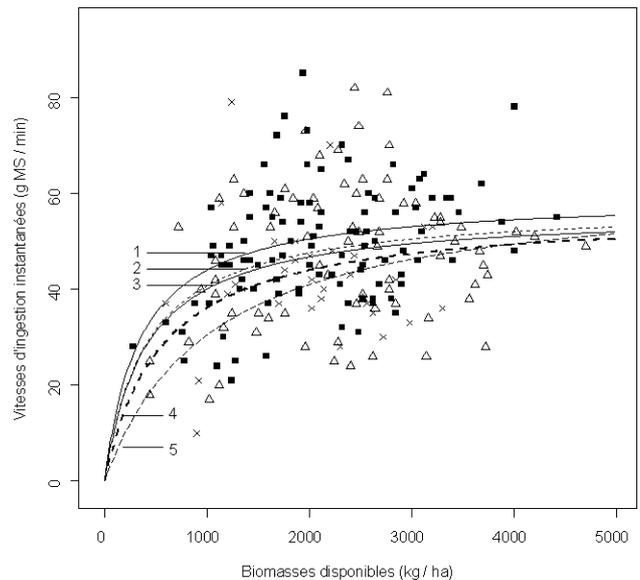


Figure 3 Vitesses d'ingestion des bovins en fonction des biomasses en février, terroir agropastoral, région de Kolda. Les trois types de végétation majoritairement consommées à cette période sont représentées : pailles de riz (carré noir, courbe 1), pailles de graminées (triangle, courbe 3) et graminées à épisaison (croix, courbe 5). La courbe 2 ajuste toutes les données des pailles, la courbe 4 toutes les données.

La dispersion des résultats montre que nous n'avons pas tous les facteurs de variation. Plusieurs peuvent être avancés : (1) la méthode de la collecte du berger est d'une précision limitée pour reproduire la prise alimentaire de l'animal ; (2) l'application d'un modèle de type Michaelis et Menten n'est pertinente que si la ressource est relativement homogène (Langevelde *et al.*, 2008). Nous devons envisager de formaliser l'ingestion par type de végétation (cf. Figure 3). Il faudrait même explorer l'intégration d'éléments structurels du couvert ; (3) une distinction par format des vaches (« grandes » et « petites ») est envisageable, ayant mis en évidence un effet significatif du format sur les VI, en SS froide ($p < 0,01$) et en SS chaude ($p < 0,1$). Nous n'avons pas mis en évidence d'effet de la gestation.

Enfin, d'après nos observations, au cours de la SS, les VI, définie par $VI = \text{fréquence des bouchées} \times \text{taille des bouchées}$ (Ungar, 1996), sont très mal corrélées aux fréquences de bouchées. Il semble que les VI soient « pilotées » par la taille des bouchées et modulées par la fréquence des bouchées.

2.2.2. Quantités excrétées et ingérées par jour

Les QI ont un intérêt fort puisqu'elles sont un indicateur des performances zootechniques et conditionnent la restitution de matière organique (MO) sur les sols. Les QI découlent directement des VI, même s'il n'est pas aisé de prédire des QI à partir de mesures ponctuelles de VI instantanées. Nous connaissons, par observations, l'évolution des QI au cours de la SS : en décembre, pleine période de « vaine pâture » (exploitation des résidus de cultures sur le glaci), le niveau d'ingestion est élevé (autour de 7 kg MS / j). Il chute sous les 5 kg MS / j dès

janvier pour se stabiliser extrêmement bas en fin de SS à moins de 4 kg MS / j (Ickowicz *et al.*, 1999).

Ces données sont en accord avec d'autres études menées en régions sahéliennes (5,8 kg MS / j sur la SS pour des zébus Azawak au Niger d'après Ayantunde *et al.*, 2001 ; de 5 à 4,5 kg MS / j pour des zébus Gobra, nord Sénégal, en fin de SS d'après Molénat *et al.*, 2003 ; autour de 5 kg MS / j pour des bovins au Sénégal d'après Diop *et al.*, 2005)).

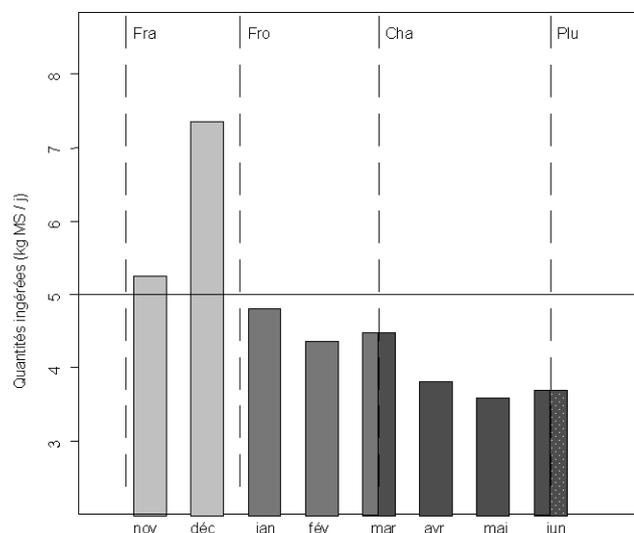


Figure 4 Evolution des quantités ingérées des troupeaux bovins au cours de la saison sèche, Kolda.

Nous avons pu dégager un effet de la gestation sur les QI en SS froide : les femelles gestantes sont pénalisées sur l'ingestion (4,7 contre 5,6 kg MS pour les vaches vides, observations en 2008). En revanche, il n'y a pas d'effet de la gestation en SS chaude : cela s'explique par une disponibilité faible des ressources fourragères à cette période.

3. DISCUSSION GENERALE

Contrairement aux systèmes clôturés, nous confirmons que la libre pâture sur parcours est conditionnée par les déplacements, qui entraînent un accroissement des besoins des animaux (130 % du besoin d'entretien pour 10 km parcourus pour une vache tarie, voir Dijkman et Lawrence, 1997 et Ezanno, 2002). Les coûts énergétiques liés au déplacement ne sont donc pas à négliger dans ces systèmes. Les déplacements sont déterminés en premier lieu par la position des points de passage obligatoires (parcs et points d'eau). Secondairement, tout se passe comme si l'ingestion était soumise aux unités de végétation traversées. Par exemple, on a observé l'attrait saisonnier des fruitiers. Haies ou banques fourragères sont donc des aménagements pouvant avoir un effet sur la forme des parcours.

Les QI sont directement liés aux VI. La Collecte du berger peut introduire une erreur de l'observateur sur les VI moyennes instantanées mesurées qui sont cependant du même ordre de grandeur que celles de bovins de 600 kg sur prairie tempérée (Dulphy et Faverdin, 1987 ; Delagarde *et al.*, 2001). Elles doivent encore être validées sur le cours de la journée. Nous avons choisi de présenter nos modèles de type Michaelis et Menten car ils sont les plus pertinents d'un point de vue biologique (vitesse d'ingestion à l'asymptote, biomasse seuil).

CONCLUSION

Pour comprendre et tester des améliorations de ces systèmes, il nous faut paramétrer les équations qui sous-tendent l'alimentation des animaux en milieux complexes. Ainsi, si la durée quotidienne des parcours est assez facilement représentée, il n'en est rien des distances parcourues. Les variables descriptives des circuits sont donc essentielles pour la compréhension des choix alimentaires sur parcours en zones sèches. Elles sont tout autant nécessaires que des variables biologiques pour la modélisation. Nous calibrons par des modèles prédictifs certains processus : temps de parcours et VI par exemple. Nous analyserons ensuite les sorties des simulations : performances animales, impacts sur les ressources et transferts de fertilité.

Une question d'intérêt pour la modélisation est de savoir quel est le poids de la fonction ingestion : les troupeaux se déplacent-ils pour ingérer ou diversifier leur régime, ou l'ingestion est-elle sous dépendance forte des déplacements ? Nos observations ainsi que le constat du côté structurant des aménagements sur les circuits nous permet de pencher pour la seconde hypothèse.

Nous adressons nos sincères remerciements à J. Teyssier (INRA), S. Messad (CIRAD) et surtout E. Tillard (CIRAD) pour leur aide nécessaire sur les analyses statistiques.

Ayantunde, A. A., Fernandez-Rivera, S., Hiernaux, P., van Keulen, H., Udo, H. M. J., Chanono, M. 2001. *Animal Science*, 72, 117-128.

Bergman, C. M., Fryxell, J. M., Gates, C. C., Fortin, D., 2001. *Journal of Animal Ecology*, 70, 289-300.

Chirat, G., Ickowicz, A., Bocquier, F., 2007. *Renc. Rech. Ruminants*, 14, 191.

Delagarde, R., Prache, S., D'Hour, P., Petit, M., 2001. *Fourrages*, 166, 189-212.

Dijkman, J. T., Lawrence, P. R., 1997. *The Journal of Agricultural Science*, 126, 95-103.

Diop, A. T., Touré, O., Ickowicz, A., Diouf, A., 2005. Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal 1964-2004, 91-105. Dakar: ISRA.

Dulphy, J.-P., Faverdin, P., 1987. *Reproduction Nutrition Development* 27, 129-155.

Ezanno, P., 2002. Thèse de doctorat. Montpellier: Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier.

Guérin, H., 1987. Thèse de doctorat. Montpellier: Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier.

Hodgson, J., 1986. *British Grassland Society. Occasional Symposium*, 19, 51-64.

Ickowicz, A., Mbaye, M., 2001. *Bois et forêts des tropiques*, 270, 47-61.

Ickowicz, A., Usengumurenyi, J., Richard, D., Colleie, F., Dupressoir, D., 1999. *Atelier jachère et systèmes agraires* (Ed. Floret, C., Pontanier, R.), 124-138. Niamey (Niger).

Langevelde, F. v., Drescher, M., Heitkonig, I. M. A., Prins, H. H. T., 2008. *Ecological Modelling*, 213, 273-284.

Manlay, R. J., Ickowicz, A., Masse, D., Feller, C., Richard, D., 2004. *Agricultural Systems*, 79, 83-107.

Molénat, G., Corniaux, C., Gueguen, S., Lacz, C., Bocquier, F., 2003. *Renc. Rech. Ruminants*, 10, 102.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C., 2006. *Livestock's long shadow, environmental issues and option.* Rome: FAO, LEAD Initiative.

Ungar, E. D., 1996. *The Ecology and Management of Grazing Systems* (Ed. Hodgson, J., Illius, A. W.), 185-218. Wallingford (UK).

**Annexe 7 : Variables de sorties de simulations
du modèle PastoTrop (version 2.1)**

Dans le chapitre 3, nous cherchons à calibrer une règle de décision de troupeaux bovins en libre pâture sur un territoire virtuel, constitué de ressources fourragères et d'aménagements (parcs de nuit, points d'eau). Afin de tester la validité des simulations, i.e. de tester l'intérêt d'un réglage donné des facteurs de décision, nous avons comparé des variables de sorties sélectionnées à des critères observés. Nous rappelons ces critères observés et leurs valeurs dans le premier tableau, ci-dessous. Ce tableau correspond au Tableau 1, dans le corps du chapitre 3.

Tableau 1 (a7). Intervalle de valeurs des variables caractéristiques observées (mini. obs. et maxi obs.) mesurées sur le territoire villageois de Saré Yoro Bana (sud du Sénégal), en milieu de saison sèche, pour des troupeaux de différentes tailles, classés en « petit » ($n = 11$) et « grand » ($n = 23$). Les variables sont distinguées par troupeau lorsque leurs valeurs sont significativement différentes au seuil de 0,05 (sauf pour l'activité de pâturage-déplacement : $P = 0,07$).

variable mesurée	mini obs.		maxi obs.	
	petit	grand	petit	grand
durée du parcours (h)	8,0		11,4	
durée entre départ et abreuvement	12,0		13,5	
distance quotidienne (km)	3,0	3,6	5,6	9,2
activité pâturage-déplacement (%)	63	56	80	84
activité déplacement (%)	9	11	26	32

Nous rappelons que l'agent 1 est comparé au troupeau « petit », l'agent 2 est comparé au troupeau « grand » et l'agent 3 est comparé au troupeau « grand », avec une différence sur le critère de distance parcourue : les valeurs de l'intervalle du critère de distance parcourue ont été multipliées par 1,43.

Dans cette Annexe, nous proposons deux tableaux, qui portent les données complètes des variables de sortie, correspondant respectivement aux Tableaux 9 et 13.

Le deuxième tableau, ci-après, qui complète le Tableau 9 du chapitre 3, présente les sorties de simulation de la première simulation puis des dix répétitions pour chacun des quatre compromis retenus initialement comme robustes.

Tableau 2 (a7). Valeurs des variables de sortie issues des simulations permises par la combinaison des valeurs des compromis présentés dans le Tableau 8, dans le corps du chapitre 3. Pour faciliter la lecture, le tableau est divisé en quatre parties : une par compromis.

Compromis	Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation
			durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâturage-déplacement (%)	activité déplacement (%)	
comp1	agent 1	initiale	8,0	5,0	5,4	69	21	OUI
		1	9,8	3,3	9,1	56	34	<i>non</i>
		2	9,8	3,5	9,4	55	35	<i>non</i>
		3	9,8	3,3	9,3	58	32	<i>non</i>
		4	9,8	3,4	10,2	48	42	<i>non</i>
		5	9,8	3,3	8,5	60	30	<i>non</i>
		6	9,8	3,2	9,8	55	35	<i>non</i>
		7	9,8	3,4	9,8	53	37	<i>non</i>
		8	9,8	3,5	10,3	52	38	<i>non</i>
		9	9,8	3,3	9,4	56	34	<i>non</i>
	10	9,8	3,3	9,1	58	32	<i>non</i>	
	agent 2	initiale	9,8	5,0	11,1	74	16	OUI
		1	13,5	2,9	17,3	36	54	<i>non</i>
		2	9,8	5,0	8,5	62	28	OUI
		3	9,8	4,6	10,8	47	43	<i>non</i>
		4	8,0	4,3	9,0	46	44	<i>non</i>
		5	9,8	5,0	8,5	63	27	OUI
		6	7,7	4,3	5,2	65	25	<i>non</i>
		7	9,8	4,3	6,4	46	44	<i>non</i>
		8	8,8	3,8	11,7	32	58	<i>non</i>
		9	9,8	4,8	8,0	66	24	OUI
	10	9,8	3,4	12,1	39	51	<i>non</i>	
	agent 3	initiale	9,8	5,0	8,7	74	16	OUI
		1	12,3	4,7	14,7	40	50	<i>non</i>
		2	12,5	4,0	14,5	43	47	<i>non</i>
		3	12,5	4,6	16,0	32	58	<i>non</i>
		4	12,9	4,5	16,2	38	52	<i>non</i>
		5	12,8	5,8	14,3	43	47	<i>non</i>
		6	12,2	4,3	8,5	58	32	<i>non</i>
		7	11,9	5,8	14,2	37	53	<i>non</i>
8		12,8	5,6	15,7	37	53	<i>non</i>	
9		12,2	4,3	7,0	65	25	<i>non</i>	
10	11,7	4,9	14,4	33	57	<i>non</i>		

Compromis	Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation
			durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâturage-déplacement (%)	activité déplacement (%)	
comp2	agent 1	initiale	9,3	4,3	5,3	74	16	OUI
		1	9,8	4,2	6,7	73	17	<i>non</i>
		2	9,8	4,3	7,4	64	26	<i>non</i>
		3	9,8	4,0	7,1	69	21	<i>non</i>
		4	8,3	4,1	7,1	51	39	<i>non</i>
		5	9,8	4,0	7,6	67	23	<i>non</i>
		6	9,8	4,0	7,2	69	21	<i>non</i>
		7	9,8	4,3	7,8	66	24	<i>non</i>
		8	9,8	3,9	7,7	70	20	<i>non</i>
		9	9,8	4,1	6,8	72	18	<i>non</i>
	10	9,8	4,2	7,2	67	23	<i>non</i>	
	agent 2	initiale	9,8	4,3	8,2	75	15	OUI
		1	9,3	3,9	9,6	41	49	<i>non</i>
		2	8,8	3,2	8,9	43	47	<i>non</i>
		3	9,2	4,1	7,5	46	44	<i>non</i>
		4	8,9	5,1	10,1	45	45	<i>non</i>
		5	9,3	4,3	6,6	60	30	OUI
		6	8,9	4,1	7,6	54	36	<i>non</i>
		7	9,8	4,9	10,5	42	48	<i>non</i>
		8	9,3	4,5	10,7	41	49	<i>non</i>
		9	9,9	4,0	5,5	68	22	OUI
	10	8,9	3,7	10,0	40	50	<i>non</i>	
	agent 3	initiale	9,8	4,2	5,6	75	15	OUI
		1	9,8	5,6	10,7	43	47	<i>non</i>
		2	13,8	4,7	10,6	53	37	<i>non</i>
		3	12,3	3,5	12,5	46	44	<i>non</i>
		4	13,2	4,1	10,1	55	35	<i>non</i>
		5	9,8	6,7	10,2	54	36	<i>non</i>
		6	12,8	3,9	13,5	47	43	<i>non</i>
		7	13,4	4,5	13,0	35	55	<i>non</i>
8		12,3	4,4	10,8	56	34	<i>non</i>	
9		13,7	5,1	7,4	66	24	<i>non</i>	
10	13,4	3,7	12,8	49	41	<i>non</i>		

Compromis	Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation
			durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâturage-déplacement (%)	activité déplacement (%)	
comp3	agent 1	initiale	8,8	4,2	5,1	73	17	OUI
		1	9,8	4,1	6,6	71	19	<i>non</i>
		2	9,8	4,3	7,1	69	21	<i>non</i>
		3	9,8	4,0	6,7	72	18	<i>non</i>
		4	9,8	4,3	7,5	69	21	<i>non</i>
		5	9,8	3,6	8,8	58	32	<i>non</i>
		6	9,8	4,0	8,9	58	32	<i>non</i>
		7	8,9	4,3	7,7	54	36	<i>non</i>
		8	9,8	4,3	6,6	72	18	<i>non</i>
		9	9,5	4,2	7,6	59	31	<i>non</i>
	10	9,8	4,3	5,6	71	19	OUI	
	agent 2	initiale	9,8	4,8	12,8	75	15	OUI
		1	8,5	3,8	6,1	67	23	OUI
		2	8,5	3,8	8,6	52	38	<i>non</i>
		3	9,9	2,6	9,6	51	39	<i>non</i>
		4	8,6	3,8	8,6	53	37	<i>non</i>
		5	9,0	3,5	7,1	60	30	OUI
		6	9,9	4,1	8,0	58	32	OUI
		7	8,4	4,0	7,9	55	35	<i>non</i>
		8	9,5	4,3	9,2	54	36	<i>non</i>
		9	9,7	3,8	9,0	56	34	<i>non</i>
	10	9,0	4,1	6,7	28	62	<i>non</i>	
	agent 3	initiale	9,8	4,5	8,4	75	15	OUI
		1	9,8	6,7	10,4	28	62	<i>non</i>
		2	9,8	5,8	11,0	48	42	<i>non</i>
		3	13,1	6,0	14,0	47	43	<i>non</i>
		4	12,3	5,6	8,2	58	32	<i>non</i>
		5	9,8	5,4	11,3	34	56	<i>non</i>
		6	9,8	5,6	12,2	36	54	<i>non</i>
		7	13,2	4,6	9,6	20	70	<i>non</i>
8		6,5	4,3	5,9	55	35	<i>non</i>	
9		9,8	6,3	11,5	34	56	<i>non</i>	
10	12,9	6,0	12,6	51	39	<i>non</i>		

Compromis	Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation
			durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâturage-déplacement (%)	activité déplacement (%)	
comp4	agent 1	initiale	9,8	4,1	5,4	73	17	OUI
		1	9,8	3,8	8,9	59	31	<i>non</i>
		2	9,8	3,7	8,4	64	26	<i>non</i>
		3	9,8	3,7	9,2	59	31	<i>non</i>
		4	9,8	3,6	8,4	65	25	<i>non</i>
		5	9,8	3,7	8,8	64	26	<i>non</i>
		6	9,8	3,6	8,5	64	26	<i>non</i>
		7	9,8	3,7	9,0	63	27	<i>non</i>
		8	9,8	3,7	8,9	63	27	<i>non</i>
		9	9,8	3,7	8,9	62	28	<i>non</i>
	10	9,8	3,6	9,0	62	28	<i>non</i>	
	agent 2	initiale	9,3	5,7	13,1	72	18	OUI
		1	9,2	3,0	8,6	52	38	<i>non</i>
		2	9,7	3,3	9,3	50	40	<i>non</i>
		3	9,3	3,8	8,2	63	27	OUI
		4	9,3	2,6	8,4	62	28	OUI
		5	9,6	3,1	10,0	51	39	<i>non</i>
		6	9,8	3,2	10,9	40	50	<i>non</i>
		7	9,3	3,6	8,8	51	39	<i>non</i>
		8	9,3	2,8	9,3	45	45	<i>non</i>
		9	9,7	3,8	11,0	34	56	<i>non</i>
	10	9,3	3,7	10,2	42	48	<i>non</i>	
	agent 3	initiale	8,8	4,1	9,2	71	19	OUI
		1	10,5	3,8	10,7	47	43	<i>non</i>
		2	10,4	3,8	9,8	56	34	<i>non</i>
		3	11,8	2,6	13,7	39	51	<i>non</i>
		4	11,2	3,8	9,5	61	29	OUI
		5	10,5	3,5	10,5	49	41	<i>non</i>
		6	12,5	4,1	12,8	49	41	<i>non</i>
		7	12,5	4,0	13,6	43	47	<i>non</i>
8		10,4	4,3	10,3	55	35	<i>non</i>	
9		12,9	3,8	15,0	44	46	<i>non</i>	
10	10,3	4,1	11,6	45	45	<i>non</i>		

Tableau 3 (a7). Valeurs des variables de sortie issues des simulations permises par la combinaison des valeurs du c1 (différent entre l'agent 1 et l'agent 2), Tableau 12, dans le corps du chapitre 3. Pour faciliter la lecture, le tableau est divisé en cinq partie : une par numéro de combinaison.

Compromis x Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation (sans critère distance quotidienne)	Validation (totale)
		durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâturage- déplacement (%)	activité déplacement (%)		
c1 agent 1	1	9,8	4,4	<i>7,1</i>	69	21	OUI	<i>non</i>
	2	9,8	4,3	<i>6,2</i>	68	22	OUI	<i>non</i>
	3	9,8	4,4	<i>6,9</i>	66	24	OUI	<i>non</i>
	4	9,8	4,3	<i>5,9</i>	72	18	OUI	<i>non</i>
	5	9,8	4,3	<i>7,3</i>	69	21	OUI	<i>non</i>
	6	9,8	4,2	<i>6,1</i>	71	19	OUI	<i>non</i>
	7	9,8	4,4	<i>6,2</i>	74	16	OUI	<i>non</i>
	8	9,8	4,3	<i>6,4</i>	69	21	OUI	<i>non</i>
	9	9,8	4,3	<i>6,2</i>	71	19	OUI	<i>non</i>
	10	9,8	4,4	<i>6,6</i>	68	22	OUI	<i>non</i>
c1 agent 2	1	9,8	4,3	7,1	70	20	OUI	OUI
	2	9,8	4,3	6,4	75	15	OUI	OUI
	3	9,8	4,3	8,0	64	26	OUI	OUI
	4	9,8	4,0	6,9	69	21	OUI	OUI
	5	9,8	4,3	7,1	69	21	OUI	OUI
	6	9,8	4,3	7,4	68	22	OUI	OUI
	7	9,8	4,3	7,4	69	21	OUI	OUI
	8	9,8	4,3	6,6	72	18	OUI	OUI
	9	9,8	4,3	6,6	73	17	OUI	OUI
	10	9,8	4,3	6,5	74	16	OUI	OUI

Compromis x Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation (sans critère distance quotidienne)	Validation (totale)
		durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâturage- déplacement (%)	activité déplacement (%)		
c2 agent 1	1	9,8	4,3	<i>6,1</i>	69	21	OUI	<i>non</i>
	2	9,8	4,3	<i>6,0</i>	71	19	OUI	<i>non</i>
	3	9,8	4,3	<i>6,2</i>	73	17	OUI	<i>non</i>
	4	9,8	4,4	<i>6,1</i>	71	19	OUI	<i>non</i>
	5	9,8	4,4	<i>6,2</i>	69	21	OUI	<i>non</i>
	6	9,8	4,2	<i>7,2</i>	68	22	OUI	<i>non</i>
	7	9,8	4,3	<i>6,2</i>	67	23	OUI	<i>non</i>
	8	9,8	4,3	<i>5,8</i>	71	19	OUI	<i>non</i>
	9	9,8	4,3	<i>6,3</i>	70	20	OUI	<i>non</i>
	10	9,8	4,3	<i>6,2</i>	69	21	OUI	<i>non</i>
c2 agent 2	1	9,8	5,0	6,8	69	21	OUI	OUI
	2	9,8	4,9	6,9	69	21	OUI	OUI
	3	9,3	5,0	7,5	66	24	OUI	OUI
	4	9,3	4,9	7,1	69	21	OUI	OUI
	5	9,8	4,3	8,2	60	30	OUI	OUI
	6	9,8	5,3	6,8	67	23	<i>non</i>	<i>non</i>
	7	9,8	4,3	9,2	53	37	OUI	OUI
	8	9,3	5,2	7,2	68	22	<i>non</i>	<i>non</i>
	9	9,4	4,9	7,1	70	20	OUI	OUI
	10	9,8	4,6	8,7	58	32	OUI	OUI

Compromis x Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation (sans critère distance quotidienne)	Validation (totale)
		durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâturage- déplacement (%)	activité déplacement (%)		
c3 agent 1	1	9,8	4,3	6,0	71	19	OUI	<i>non</i>
	2	9,8	4,3	6,5	69	21	OUI	<i>non</i>
	3	9,8	4,3	6,5	72	18	OUI	<i>non</i>
	4	9,8	4,4	5,8	72	18	OUI	<i>non</i>
	5	9,8	4,3	6,2	70	20	OUI	<i>non</i>
	6	9,8	4,4	6,2	73	17	OUI	<i>non</i>
	7	9,8	4,4	5,8	74	16	OUI	<i>non</i>
	8	9,8	4,3	7,4	69	21	OUI	<i>non</i>
	9	9,8	4,3	6,2	69	21	OUI	<i>non</i>
	10	9,8	4,5	6,8	67	23	OUI	<i>non</i>
c3 agent 2	1	9,8	4,4	6,4	71	19	OUI	OUI
	2	9,8	4,6	7,7	65	25	OUI	OUI
	3	9,8	4,4	7,2	69	21	OUI	OUI
	4	9,8	4,6	7,0	68	22	OUI	OUI
	5	9,8	4,3	6,3	69	21	OUI	OUI
	6	9,8	4,4	7,0	68	22	OUI	OUI
	7	9,8	4,6	7,2	67	23	OUI	OUI
	8	9,8	4,5	7,7	64	26	OUI	OUI
	9	9,8	4,6	6,9	65	25	OUI	OUI
	10	9,8	4,5	7,7	64	26	OUI	OUI

Compromis x Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation (sans critère distance quotidienne)	Validation (totale)
		durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâturage- déplacement (%)	activité déplacement (%)		
c4 agent 1	1	9,8	3,9	5,7	72	18	OUI	non
	2	9,8	4,3	5,9	72	18	OUI	non
	3	9,8	4,3	6,1	69	21	OUI	non
	4	9,8	4,3	6,2	71	19	OUI	non
	5	9,8	4,4	6,0	70	20	OUI	non
	6	9,8	4,3	7,4	69	21	OUI	non
	7	9,8	4,3	6,6	66	24	OUI	non
	8	9,8	3,9	6,0	67	23	OUI	non
	9	9,8	4,2	7,2	67	23	OUI	non
	10	9,8	4,3	6,6	70	20	OUI	non
c4 agent 2	1	9,8	4,5	8,2	58	32	OUI	OUI
	2	9,8	5,0	6,9	68	22	OUI	OUI
	3	9,8	4,3	6,6	65	25	OUI	OUI
	4	9,8	5,3	7,0	68	22	non	non
	5	9,3	5,0	7,5	66	24	OUI	OUI
	6	9,8	4,9	7,0	68	22	OUI	OUI
	7	9,3	5,3	7,7	65	25	non	non
	8	9,3	4,4	7,2	66	24	OUI	OUI
	9	9,8	4,4	9,1	58	32	OUI	OUI
	10	9,8	4,6	7,3	69	21	OUI	OUI

Compromis x Agent	Répétition	Variables de sortie					Validation (sans critère distance quotidienne)	Validation (totale)
		durée du parcours (h)	durée entre départ et abreuvement (h)	distance quotidienne (km)	activité pâturage- déplacement (%)	activité déplacement (%)		
c5 agent 1	1	9,8	4,3	6,5	67	23	OUI	<i>non</i>
	2	9,8	3,9	5,7	70	20	OUI	<i>non</i>
	3	9,8	4,3	6,6	67	23	OUI	<i>non</i>
	4	9,8	4,5	6,1	71	19	OUI	<i>non</i>
	5	9,8	4,2	5,8	73	17	OUI	<i>non</i>
	6	9,8	4,3	7,2	69	21	OUI	<i>non</i>
	7	9,8	4,3	6,1	71	19	OUI	<i>non</i>
	8	9,8	4,2	6,1	72	18	OUI	<i>non</i>
	9	9,8	3,9	6,0	69	21	OUI	<i>non</i>
	10	9,8	4,3	7,0	66	24	OUI	<i>non</i>
c5 agent 2	1	9,8	4,8	9,7	50	40	<i>non</i>	<i>non</i>
	2	9,8	4,4	8,7	58	32	OUI	OUI
	3	9,8	4,6	7,2	69	21	OUI	OUI
	4	9,8	4,5	7,6	69	21	OUI	OUI
	5	9,0	4,9	6,5	71	19	OUI	OUI
	6	9,8	5,2	6,8	72	18	OUI	OUI
	7	9,4	4,4	6,9	69	21	OUI	OUI
	8	9,8	5,2	9,4	52	38	<i>non</i>	<i>non</i>
	9	9,3	4,7	7,0	67	23	OUI	OUI
	10	9,8	5,2	7,7	68	22	OUI	OUI

Titre : Description et modélisation du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours, en zone tropicale sèche.

Résumé : Les régions tropicales sub-arides à semi-arides, qui englobent une large part du cheptel bovin mondial, sont concernées par l'accroissement durable de la productivité des bovins. Pendant la saison sèche, qui peut durer 9 mois, les troupeaux exploitent librement les végétations spontanées des parcours et les résidus de cultures. Partant d'observations sur les activités des animaux sur parcours, l'ingestion et les circuits en territoire sahélo-soudanien, nous avons construit un modèle orienté troupeau qui simule ces comportements spatiaux (circuits) et alimentaires (activités et vitesses d'ingestion). Notre démarche a consisté à intégrer successivement les éléments nécessaires et suffisants pour représenter ces comportements. L'heuristique des règles de choix des agents Troupeaux combine des éléments d'observations directes et de théories éthologiques : facteurs liés à la ressource fourragère (nature des couverts, biomasses) et autres facteurs abiotiques (attractions vers le point d'eau et le parc de nuit) ou traditionnels (pratiques de l'éleveur). L'intégration des processus d'ingestion à court terme s'appuie sur nos résultats originaux qui relient les biomasses disponibles aux vitesses d'ingestion, pour faire émerger des quantités ingérées. Ces relations s'inscrivent dans le cadre théorique de la Réponse fonctionnelle. Le couplage de l'étude des circuits quotidiens avec la prévision de l'ingestion a permis des calibrages de règles de choix des agents représentatives des comportements observés. Malgré la parcimonie de notre démarche, nous avons veillé à une représentation des phénomènes biologiques qui assure la portabilité de ce modèle à d'autres systèmes d'élevage sur parcours semi-arides, sous conditions d'ajustement de paramètres. Enfin, cette thèse propose une méthodologie originale pour représenter les prélèvements alimentaires spatialisés des bovins sur parcours tropicaux dans un objectif d'intensification écologique.

Mots-clés : Bovins tropicaux, agropastoralisme, parcours, libre pâture, résidus de cultures, biomasses des couverts, ingestion, modélisation multi-agents, intensification écologique.

Title: Description and modeling of daily circuits and spatial intake of free-ranging cattle herds in dry agropastoral systems.

Abstract: Arid and sub-arid areas, where are located most of the world's cattle, are concerned by a sustainable improvement of their productivity. During the dry season, that can last 9 months, herds range free on territories made of spontaneous plants and crop residues from cultivated areas. From observations of animal activities, intake rates and daily circuits on a sahelo-sudanian territory, we built a herd-oriented model which simulates spatial behavior (circuits) and feed intake (spatialized intake). Our approach consisted in introducing successively the very necessary information that realistically represents animal behaviors. The heuristic rules of herds' choices are a combination of our observations and ethological theories: i.e. factors linked to pastoral resources (cover types, biomass) and other abiotic factors (attraction to watering point and to night park) or to human decisions (breeder's practices). Integration of short-term intake process is based on relationships established between intake rate and available biomass of each cover type in order to emerge daily intakes. Altogether, the implemented equations are within the theoretical frame of the Functional response. The coupling of daily simulated circuits with prevision of intake, allowed calibration of agents Herds decision rules that fit observed behaviors. Although parsimonious, our approach kept the necessary representation of biological phenomena in order to ensure a model transportability to other semi-arid rangeland systems, if parameters are adjusted. Finally, this thesis proposes an original methodology to simulate spatialized feed uptakes by free-ranging cattle in the tropics, with ecological production improvement as a goal.

Keywords: Tropical cattle, agropastoralism, rangelands, free-ranging, crop residues, cover biomasses, intake, multi-agents modeling, agroecology.
