

Département de géographie et télédétection
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

Évaluation d'un écosystème pastoral sahélien :
apport de la géomatique
(Oursi – Burkina Faso)

par

Séraphine S. KABORÉ , 1958 -

I-1827

BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Thèse présentée pour l'obtention du grade de
Philosophiae Doctor (Ph.D.) en télédétection

© Séraphine S. Kaboré, 2001

RÉSUMÉ

L'objectif principal de cette recherche est la mise au point d'une architecture d'intégration de données socio-bio-géographiques et de données satellitaires dans un Système d'Information Géographique (SIG) en vue d'une aide à la prise de décisions dans un environnement semi-aride au nord du Burkina Faso. Elle répond à la question fondamentale de l'interprétation des effets des facteurs climatiques et socioéconomiques sur le milieu pastoral. La recherche s'est appuyée sur plusieurs hypothèses de travail : possibilité d'utilisation de modèle de simulation, d'approche multicritère et de données de télédétection dans un cadre de système d'information géographique.

L'évolution spatiotemporelle des paramètres de productivité du milieu a été évaluée par approche dynamique selon le modèle de Wu et al. (1996) qui modélise les interactions entre le climat, le milieu physique, le végétal et l'animal pour mieux quantifier la biomasse primaire. À ce modèle, quatre paramètres ont été intégrés par approche floue et multicritère afin de prendre en compte la dimension socioéconomique de la productivité pastorale (apport majeur de la recherche) : la santé, l'éducation, l'agriculture et l'eau. La télédétection (imagerie SPOT) a permis de définir la production primaire à partir de laquelle les simulations ont été réalisées sur 10 années.

Les résultats obtenus montrent une bonne corrélation entre biomasse primaire *in situ* et celle calculée pour les deux modèles, avec toutefois une meilleure efficacité du modèle modifié (4 fois plus) dans les zones de forte productivité où l'on note un taux de surexploitation agricole élevé. À cause de la variabilité spatiale de la production primaire *in situ*, les erreurs des résultats de simulation (8 à 11%) sont acceptables et montrent la pertinence de l'approche grâce à l'utilisation des SIG pour la spatialisation et l'intégration des différents paramètres des modèles.

Les types de production secondaire préconisés (production de lait pendant 7 mois ou de viande pendant 6 mois) sont basés sur les besoins de l'UBT et le disponible fourrager qui est de qualité médiocre en saison sèche. Dans les deux cas de figure, un déficit fourrager est observé. Deux types de transhumance sont proposés afin d'assurer une production durable selon deux scénarios : exploitation rationnelle des unités pastorales selon un plan de rotation annuelle et mise en défens à moyen terme des zones dégradées pour une régénération. Les zones potentielles pour la

transhumance ont été déterminées selon les limites acceptables des critères d'exploitation durable des milieux sahéliens définis par Kessler (1994) soit $0,2 \text{ UBT} \cdot \text{ha}^{-1}$.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vi
Liste des annexes.....	vii
Glossaire	viii
Remerciements.....	xiii
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique.....	1
1.1.1 <i>Le Sahel et le pastoralisme.....</i>	<i>1</i>
1.1.2 <i>Les écosystèmes pastoraux et gestion durable.....</i>	<i>4</i>
1.1.3 <i>Les modèles de simulation de la production des pâturages.....</i>	<i>5</i>
1.1.4 <i>Le SIG comme outil d'aide à la décision.....</i>	<i>8</i>
1.1.5 <i>L'apport des données de télédétection et leur accès.....</i>	<i>9</i>
1.2 Objectifs et portée de la recherche.....	11
1.2.1 <i>L'objectif scientifique principal.....</i>	<i>11</i>
1.2.2 <i>Les objectifs scientifiques spécifiques.....</i>	<i>11</i>
1.3 Les hypothèses de recherche.....	12
1.4 Les applications envisagées de la recherche.....	13
1.5 Organisation de la thèse.....	13
CHAPITRE 2 - CONCEPTS FONDAMENTAUX.....	14
2.1 Introduction.....	14
2.2 Concepts de base en écologie.....	14
2.3 Fondements de la modélisation et de l'art de simulation des écosystèmes pastoraux.....	17
2.3.1 <i>Les modèles analytiques ou déterministes.....</i>	<i>18</i>
2.3.1.1 <i>Les modèles simples.....</i>	<i>18</i>

2.3.1.2	La modélisation par compartiment	24
2.3.2	<i>Les modèles stochastiques</i>	24
2.3.3	<i>La modélisation par simulation</i>	24
2.4	Développement durable des milieux sahéliens	25
2.4.1	<i>Qu'est-ce que le développement durable?</i>	25
2.4.2	<i>Quelles sont les perspectives de développement durable pour la zone sahélienne ?</i>	28
2.5	Les systèmes d'information géographique	29
2.6	Les fondements de la théorie floue et son application à la modélisation des phénomènes spatiaux	31
2.7	L'analyse multicritère pour la décision multicritère	33
2.8	Conclusion partielle	33
 CHAPITRE 3 - LES PARAMÈTRES INDICATEURS DE DURABILITÉ DU MILIEU PASTORAL SAHÉLIEN		
3.1	Introduction	34
3.2	Au niveau de la productivité primaire	34
3.2.1	<i>Le climat</i>	35
3.2.1.1	La pluviosité	35
3.2.1.2	L'évapotranspiration	37
3.2.1.3	Le vent	37
3.2.2	<i>Les conditions physiques du substrat</i>	38
3.2.3	<i>La végétation</i>	42
3.2.3.1	Le taux de recouvrement	42
3.2.3.2	La composition floristique et l'abondance numérique	42
3.2.3.3	La biomasse herbacée et ligneuse.....	43
3.2.4	<i>Les résidus de récolte</i>	44
3.3	Durabilité au niveau de la productivité secondaire	46
3.3.1	<i>La qualité du fourrage</i>	46
3.3.2	<i>Les caractéristiques intrinsèques de l'UBT</i>	48
3.3.3	<i>Gestion et conduite des troupeaux</i>	49
3.3.4	<i>La disponibilité de l'eau</i>	51

3.4 Durabilité au niveau du producteur	51
3.4.1 <i>L'accès aux soins de santé.....</i>	52
3.4.2 <i>L'accès à l'éducation et à la terre.....</i>	52
3.5 Conclusion partielle.....	53
CHAPITRE 4 - MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	54
4.1 Introduction.....	54
4.2 Le cadre conceptuel d'intégration des données	56
4.2.1 <i>Le modèle de WU et al. (1996) pour la prévision de la biomasse : intrants et approches.....</i>	57
4.2.1.1 L'indice caractéristique du milieu	57
4.2.1.2 La couverture basale	59
4.2.1.3 La pluviométrie.....	60
4.2.1.4 La charge animale.....	62
4.2.1.5 L'indice d'humidité du sol.....	63
4.2.1.6 La biomasse primaire et la biomasse maximale potentielle	63
4.2.2 <i>Modèle de Wu modifié : contribution des paramètres socioéconomiques et méthode de traitement.....</i>	65
4.2.2.1 L'indice de surexploitation agricole	67
4.2.2.2 Le niveau de santé et d'éducation de la population	69
4.2.2.3 L'hydraulique pastorale	71
4.3 Données satellitales : disponibilité et méthodes de traitements.....	71
4.4 Vérification des modèles et validation	72
4.5 Élaboration des scénarios d'aménagement et de gestion	75
4.6 Zone d'application de la recherche.....	77
CHAPITRE 5 - PRÉSENTATION, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	79
5.1 Spatialisation des données et paramètres intrants des modèles.....	79
5.1.1 <i>La pluviométrie.....</i>	79
5.1.2 <i>La couverture basale et l'état de sécheresse</i>	81
5.1.2.1 La couverture basale initiale.....	81

5.1.2.2 L'état de sécheresse	83
5.1.3 La biomasse herbacée (initiale & maximale) et la biomasse ligneuse.....	86
5.1.4 La biomasse herbacée de 1996.....	88
5.1.5 L'indice caractéristique du milieu.....	89
5.1.6 La surexploitation agricole.....	89
5.1.7 La santé, l'éducation et l'eau d'abreuvement	92
5.2 Validation et interprétation des résultats de la simulation.....	95
5.2.1 La biomasse primaire simulée	95
5.2.2 Sensibilité de la biomasse aux paramètres socioéconomiques (I_{SAG} , I_{AE} , I_{DE})....	100
5.3 Conclusion partielle.....	103
CHAPITRE 6 - PRODUCTIVITÉ SECONDAIRE DU MILIEU ET SCENARIOS DE GESTION	105
6.1 Analyse du potentiel de production secondaire	105
6.2 Les circuits de transhumance	107
6.3 Les scénarios de gestion et la productivité secondaire	109
6.3.1 Le scénario I.....	111
6.3.2 Le scénario II.....	111
CHAPITRE 7 - CONCLUSION ET ORIGINALITÉ DE LA RECHERCHE.....	115
7.1 Conclusions générales.....	115
7.2 Originalité de la recherche.....	116
7.3 Recommandations.....	117
BIBLIOGRAPHIE	119
ANNEXES	132

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Techniques de modélisation écologique	18
Figure 2 : Classification du système pastoral selon Caughley (1975).....	23
Figure 3 : Schéma général de la méthodologie de recherche	55
Figure 4 : Concept de modélisation des interactions climat-sol-végétation-animal.....	61
Figure 5 : Schéma du modèle de Wu modifié	67
Figure 6 : Province de l'Oudalan : disponibilité des images satellitales	74
Figure 7 : Évaluation de l'occupation des sols et de la biomasse primaire par télédétection....	75
Figure 8 : Schéma conceptuel de l'interaction des paramètres sociobiophysiques	78
Figure 9 : Distribution de la pluviométrie à Oursi.....	80
Figure 10 : Réponse du couvert basal à la sécheresse	81
Figure 11 : Carte-image du taux de couverture basale de 1986 (en %)......	82
Figure 12 : Carte-image de la charge animale spatialisée en UBT.ha ⁻¹ du département d'Oursi	85
Figure 13 : Carte-image de la capacité de charge de référence	86
Figure 14 : Carte-image de potentiel de production primaire (Vmax en kgMS.ha ⁻¹).....	87
Figure 15 : Relation entre NDVI et biomasse primaire (1996)	88
Figure 16 : Carte des sols du département d'Oursi (ref. annexe 8)	91
Figure 17 : Carte-image d'indice de surexploitation agricole	92
Figure 18 : Cartes-images d'indices socioéconomiques.....	93
Figure 19 : Biomasse herbacée simulée selon les deux modèles.....	96
Figure 20 : Corrélation globale entre le modèle de Wu et les données <i>in situ</i>	96
Figure 21 : Corrélation globale entre le modèle de Wu modifié et les données <i>in situ</i>	97
Figure 22 : Sensibilité de la biomasse en fonction de l'indice d'accès à la santé	102
Figure 23 : Production moyenne de biomasse herbacée (1986-1996) en kg.MS.ha ⁻¹	104
Figure 24 : Carte-image des zones potentielles pour la transhumance.....	109
Figure 25 : Stratégie d'exploitation des UP selon les saisons en %	110
Figure 26 : Qualité de la biomasse : teneur en UF selon les saisons	111
Figure 27 : Schéma de mise en œuvre des stratégies de gestion	114

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Coefficient de ruissellement au Sahel estimé à l'aide de la texture	40
Tableau 2 : Relations allométriques entre biomasse foliaire et paramètres physiques.....	45
Tableau 3 : Rapport grain paille des principales espèces cultivées dans la zone	45
Tableau 4 : Classification de la qualité des fourrages	48
Tableau 5 : Évaluation des besoins en UF et MAD.....	49
Tableau 6 : Besoins journaliers en eau par espèce animale.....	51
Tableau 7 : Normes OMS en personnel de santé (unité pour x habitants)	53
Tableau 8 : Échelle de comparaison binaire	68
Tableau 9 : Charge réelle du département d'Oursi (1986)	84
Tableau 10 : Productivité primaire et potentielle de la zone d'étude (en kg.MS.ha ⁻¹)	87
Tableau 11 : Comparaison de la biomasse herbacée de 1996 selon 3 méthodes d'évaluation (en kg MS.ha ⁻¹)	89
Tableau 12 : Scores des critères.....	90
Tableau 13 : Résultats de simulation de la biomasse herbacée (1996) : quantité et écart type (en kg.MS.ha ⁻¹); erreur relative (en %).....	95
Tableau 14 : Efficacité de prédiction de la biomasse	98
Tableau 15: Capacité de charge moyenne de la zone d'étude (en UBT.ha ⁻¹ .an ⁻¹).....	106
Tableau 16 : Valeur fourragère de la production primaire en 1996.....	107
Tableau 17 : Scénarios de gestion et charge supportable en UBT	112
Tableau 18 : Scénarios de gestion et production de lait : déficit en UBT	112
Tableau 19 : Scénarios de gestion et production de viande : déficit en UBT.....	112
Tableau 20 : Stratégie de production secondaire et importance de la transhumance	113

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Guide de programmation.....	132
Annexe 2 : Classification des années et critères	135
Annexe 3 : Classification des années sur 42 années d'observation pour Gorom:	136
Annexe 4 : Description floristique des UP:	137
Annexe 5 : Carte-images des critères d'aptitude des sols pour l'agriculture pluviale au Sahel	138
Annexe 6 : Aptitude des unités de sol pour l'agriculture	141
Annexe 7 : Exigence des principales cultures de la zone (selon BUNASOLS, 1989).....	142
Annexe 8 : Description des unités de sol du département d'Oursi.....	146
Annexe 9 : Indice de disponibilité de l'eau en saison sèche dans la province de l'Oudalan...	147
Annexe 10 : Carte-image d'indice de surpâturage 1996	148

GLOSSAIRE

r_v	Taux de croissance intrinsèque de la végétation
$\mu_s(\mathbf{u})$	Degré d'appartenance
S	Ensemble flou
\hat{y}_i	Valeur simulée
γ	Paramètre
β	Taux de croissance des prédateurs en fonction de l'abondance des proies
α	Effet des prédateurs sur les proies
σ	Paramètre exprimant l'impact du bétail sur l'indicateur de surpâturage $O_G(t)$
τ_{AE}	Sensibilité de la biomasse par rapport à l'accès à l'éducation
τ_{AS}	Sensibilité de la biomasse par rapport à la santé
α_{ci}	Taux de variation du taux de couverture basale durant la phase i
τ_{DE}	Sensibilité de la biomasse par rapport à la disponibilité de l'eau
α_i	Poids du critère i
$\Delta K(t)$	Indice de dégradation du sol à l'instant t
α_{pi}	Poids pour le type de personnel considéré
ΔX	Variation de la sécheresse
a	Facteur de normalisation
b	Facteur d'échelle
B_H	Besoins alimentaires de l'herbivore ($\text{kg MS. jour}^{-1}\text{UBT}^{-1}$)
BUNASOLS	Bureau National des Sols
$B_v(t)$	Taux de reproduction des animaux en réponse à la disponibilité de la biomasse
$C(t)$	Taux de couverture basale de la végétation
c_H	Taux de reproduction intrinsèque de l'herbivore

c_i	Indice de couverture végétale en une phase i donnée de développement
C_o	Taux de couverture aérienne
C_{OcSols}	Carte d'occupation des sols
c_r	Coefficient de reproduction dépendant de la végétation
$CrCap$	Croît capitalisé en pourcentage
crn	Capacité de rétention des éléments nutritifs
C_{SAG}	Critère de surexploitation agricole
C_{tronc}	Circonférence du tronc
d_1	Efficacité de la pâture en cas de rareté de la végétation
d_2	Efficacité démographique de l'herbivore en période de pénurie de la végétation
DAG	Disponible annuel global en pourcentage
D_b	Diamètre à la base
DC_{NIR}	Compte numérique dans le proche infrarouge
DC_R	Compte numérique dans le rouge
dispE	Disponibilité en eau pour les cultures
DEP	Direction des études et de la planification
d_{id}	Distance idéale
d_{max}	Distance maximale
dn	Disponibilité en éléments nutritifs
d_r	Distance actuelle
DS	État de sécheresse
ér	Résistance à l'érosion
ERQM	Erreur quadratique moyenne
F	Taux de fécondité
ger	Conditions de germination
GMQ	Gain moyen quotidien
$GP(t)$	Pression animale à l'instant t due à la pâture (charge actuelle)
GP_{ref}	Pression animale de référence
h	Taux de reproduction actuelle de l'UBT

H	Densité animale ou charge animale
ha	Hectare
H_{ind}	Hauteur de l'individu
$L(t)$	Impacts négatifs des différents paramètres de productivité primaire
$L_+(t)$	Effets positifs des différents paramètres de productivité primaire
I_{AE}	Indice d'accès à l'éducation
I_{AS}	Indice d'accès à la santé
ICA	Indice de consistance aléatoire
I_{DE}	Indice de disponibilité d'eau pour le bétail
ILWIS	Integrated Land and Water Information System
I_{Ppi}	Indice de proximité du paramètre considéré (i)
I_{PS}	Indice de disponibilité en personnel de santé
IRD	Institut de recherche pour le développement
I_{SAG}	Indice de surexploitation agricole
$K(t)$	Indice caractéristique du milieu qui exprime l'état écologique du milieu en un temps de référence donné t
k	Nombre de paramètres considérés (type de personnel)
kg	Kilogramme
l	Proportion de biomasse perdue due au piétinement et à la décomposition
LAI	Leaf Area Index
m	Taux de mortalité
$m.s^{-1}$	Mètre par seconde
MAB	Matière azotée brute en gramme
MAD	Matière azotée digestible
MHM	Méthode de hiérarchie multicritère
MJ	Milli Joule
MO	Matière organique
MS	Matière sèche
N	Azote

NAE	Nombre d'animaux exploités
NDVI	Normalized Differential Vegetation Index
NDVI _ρ	NDVI au niveau du sol
NDVI _{ρ*}	NDVI déterminé à partir de la réflectance apparente au niveau du satellite
N _{jr}	Nombre de jours
NP _i	Nombre du type de personnel considéré
N _{pSC}	Nombre d'enfants scolarisables (7-14 ans)
N _{SC}	Nombre d'enfants scolarisés
O _G	Indice de surpâturage
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ORSTOM	Office de Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
oxy	Disponibilité en oxygène
P	Phosphore
PB	Protéine brute
PD	Protéine digestible
P _F	Production de biomasse foliaire
PG	Productivité globale
PN	Productivité numérique (taux d'exploitation du troupeau)
PIB	Produit Intérieur brut
P _o	Population
P _{O_{max}}	Valeur maximale à laquelle la population se stabilise
P _{O_{préd}}	Population des prédateurs
P _{O_{proie}}	Population des proies
P _{sF}	Poids spécifique de la feuille
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
PV	Poids vif
PV _T	Population totale
r	Taux de croissance
R(t)	Indice de pluviométrie effective
R ²	Coefficient de détermination

rac	Conditions d'enracinement
Rc	Indice d'humidité
RC	Ratio de cohérence
Rd(t)	Indice de distribution exprimant la variation saisonnière
rin	Risques d'inondation
Rp(t)	Indice de précipitation exprimant la variation interannuelle
R _{ref}	Pluviométrie effective de référence
S	Pente
s	Paramètre convertissant l'indice de surpâturage en pente équivalente
S _c	Surface de la couronne
sel	Excès de sels
SIG	Système d'information géographique
SPUR	Simulation of Production and Utilization of Rangelands
SR	Sex ratio
STEP	Sahelian Transpiration, Evaporation and Productivity model
t	Temps
trs	Facilité de travail du sol
T _{sc}	Taux de scolarisation
u	Propriété d'un facteur donné
UBT	Unité Bétail Tropical
UF	Unité fourragère équivalent d'un kilogramme d'orge en grain produisant 1883 calories pour les ruminants
UNSO	Organisation des Nations Unies pour le Sahel
UP	Unité pastorale
V	Biomasse primaire
V _{max}	Biomasse primaire maximale
X(t)	Pression cumulée de pâture due à la sécheresse
y _i	Valeur observée
Z _{SAG}	Zone de surexploitation agricole

REMERCIEMENTS

Au professeur Goze B. Bénié qui a dirigé ce travail avec patience et grand intérêt, j'exprime toute ma gratitude. Vos encouragements et votre soutien ont été très bénéfiques et fort appréciés.

Au Dr. Kalifa Goïta pour ses conseils et critiques, j'exprime ma reconnaissance. Mes remerciements également au professeur Michel Rheault.

L'accomplissement de cette recherche a été possible grâce au soutien financier, technique et logistique des organismes suivants : l'ACDI à travers la Francophonie, le CRDI, l'ORSTOM de Ouagadougou, le programme EDOT du Centre canadien de télédétection, le projet PAAP du Ministère des Ressources Animales du Burkina, le CONAGES du Ministère de l'Environnement du Burkina et le CRSNG à travers le CARTEL. À tous, j'exprime ma profonde gratitude qui s'adresse particulièrement à Mme Micheline Roberge, M. Alioune Camara, M. Louis Albert Lake, Dr Michel Devineau, M. Bob Gauthier, Dr Marcel Nagalo et Dr Mamadou Sissoko.

À ma fille Ghislaine, je te dis merci pour ton soutien, notamment lors de ces moments de stress qui, plus d'une fois, ont été durs à supporter. Courage et succès à toi.

À Georgina qui m'a soutenue en tout temps, je te dis simplement merci et courage pour la suite. À Sana également, tous mes remerciements et encouragements pour le point final.

À tous mes amis et collègues du Burkina et du CARTEL qui, d'une manière ou d'une autre m'ont soutenue, je vous dis merci.

Enfin et non des moindres, je voudrais exprimer ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mes parents, mes frères et sœurs. Durant ces longues années, vous n'avez cessé de me porter dans vos prières quotidiennes et de me prodiguer vos encouragements pour mener à terme cette recherche. Grand merci et que Dieu vous bénisse tous.

Ce chapitre introduit la problématique de notre sujet de recherche intitulé «Évaluation d'un écosystème pastoral sahélien : apport de la géomatique (Oursi – Burkina Faso)». Il explore la complexité des écosystèmes pastoraux sahéliens qui rend leur évaluation délicate. Les questions liées à la détermination des paramètres de production de biomasse primaire et à leur quantification sont abordées, de même que celles relatives à leur gestion. Par ailleurs, la problématique de la gestion durable de ces milieux et de l'intégration spatiale de données de sources différentes dans un cadre systémique est exposée : données auxiliaires, données in situ, données de télédétection, fiabilité des données intrants des modèles, etc. Enfin, les objectifs fondamentaux et les hypothèses de recherche sont présentés.

1.1 Problématique

1.1.1 Le Sahel et le pastoralisme

Le Sahel constitue une zone de terres arides durant de longs mois, mais aussi une zone de pâturage partagée entre d'immenses espaces de transhumance et des terroirs cultivés et étroitement liés à la présence d'eau (Riou, 1989). De cette définition découle toute la problématique du Sahel : comment exploiter et gérer de manière durable des ressources naturelles peu abondantes, caractérisées par une variation spatiotemporelle fortement influencée par des conditions climatiques très sévères, qu'accentuent des facteurs anthropiques liés à des systèmes de gestion ancestrale non appropriés de nos jours ?

L'activité principale au Sahel est l'élevage, mené de manière extensive sous l'appellation de «pastoralisme». Le pastoralisme, qui est en soi tout un mode de vie, s'appuie essentiellement

sur les ressources naturelles et le bétail. La végétation naturelle est exploitée par les animaux mobiles tout le long de l'année. L'eau (facteur climatique) constitue le principal moteur de cette activité. Au Burkina Faso, pays agricole, le pastoralisme assure à plus de la moitié de la population, des revenus substantiels (13 % du PIB en 1996), d'où son importance dans le développement économique du pays. Cependant, les aléas climatiques, la dégradation biophysique du milieu et la démographie galopante constituent des paramètres qui oblitèrent le développement de cette activité majeure, fortement tributaire de la disponibilité en eau et de la productivité des pâturages (Breman et de Ridder, 1991, Grouzis, 1988). Dans le Sahel Burkinabé, les pâturages sont constitués essentiellement de graminées annuelles (*Shoenefeldia gracilis*, *Cenchrus biflorus*) et de ligneux fourragers (*Acacia sp.*, *Balanites aegyptiaca*). Les ressources en eau proviennent de cours d'eau tels que le Béli, des mares et des puits pour la plupart temporaires et de quelques forages «man made». De plus, ces ressources éparses et précaires ne sont pas toujours bien gérées et les méthodes utilisées ne prennent pas en compte tous les facteurs exogènes indirects tels que les facteurs anthropiques et socioéconomiques pouvant influencer la productivité du milieu. Une autre caractéristique du Sahel est aussi la pauvreté en données qualitatives et surtout quantitatives sur les paramètres déterminants de la productivité de l'écosystème. Même lorsqu'elles existent, elles sont soit entachées d'erreurs et peu fiables, soit incomplètes.

Face à toutes ces réalités, prédire la variabilité spatiotemporelle de la production primaire et élaborer des méthodes de gestion adéquates dans ce milieu si fragile constituent un défi grand à relever. Ce défi est encore plus grand si l'on veut des approches à la fois simples, fiables et applicables à de telles situations de non disponibilité de données précises et détaillées.

En effet, la gestion du milieu pastoral impose des approches permettant de mieux comprendre les interactions des différents éléments du milieu et d'assurer des prises de décisions soutenues et rationnelles. Au Burkina Faso, les méthodes utilisées restent traditionnelles et sont essentiellement basées sur des études souvent sectorielles. Ceci a pour conséquence des considérations non holistiques des systèmes aboutissant à des prises de décisions souvent inappropriées, les paramètres essentiels influençant la productivité du milieu n'étant pas tous considérés. Plusieurs approches de développement de l'élevage, notamment les approches

basées essentiellement sur la santé animale, ont ainsi abouti à des échecs entraînant un perpétuel recommencement dans la définition des politiques de développement.

Cependant, certaines zones telles que Oursi dans la province de l'Oudalan (extrême nord du pays) ont bénéficié d'une attention particulière suite à la sécheresse de 1971 qui a eu un retentissement mondial sans égal : études physiques et socioéconomiques. Ces études, menées essentiellement par l'ORSTOM et certains bailleurs de fonds (Pays-Bas, UNSO), avaient pour but majeur d'assurer une meilleure compréhension de ce milieu (apparemment hostile) et de son tissu social afin de mieux définir les programmes de gestion et de développement des ressources agropastorales. Ainsi, pour cette zone, il existe plusieurs données auxiliaires mais elles sont de sources diverses, tant sur le plan des modes d'acquisition, des formats que des échelles :

- au niveau du climat, nous citerons entre autres les données des travaux de Albergel et *al.* (1985), Chevalier et *al.* (1985) et ceux de Claude et *al.* (1991);
- sur les aspects écologiques du milieu, les travaux de Toutain (1976), de Grouzis (1988), Devineau et *al.* (1992) et de Ganaba (1994) offrent une base importante de données, notamment en ce qui concerne la végétation dont la répartition spatiale, la composition floristique et la productivité ont été largement étudiées;
- enfin, la caractérisation physique du milieu (géomorphologie et sols) a été réalisée à travers les travaux de Leprun (1977), ceux du BUNASOLS (1989), ainsi que ceux de Zombré (1996).

Si les résultats de ces études peuvent servir de base pour définir la productivité primaire et secondaire de ce milieu, l'absence d'une architecture d'intégration de ces données variées constitue un autre goulot d'étranglement. De plus, cette diversité des données suppose autant de diversité sur le plan des erreurs : imprécisions, incertitudes et aussi sur le plan de leur incomplétude; les zones géographiques couvertes par ces différentes études n'étant pas toujours les mêmes.

L'élaboration d'approches méthodologiques fiables et applicables à l'aide d'outils d'analyse et de gestion pour une exploitation durable des écosystèmes pastoraux sahéliens reste donc un autre défi à relever.

1.1.2 Les écosystèmes pastoraux et gestion durable

Tout écosystème est dynamique, complexe, difficile à définir et à délimiter dans le temps et l'espace (Archer et Smeins, 1991). L'écosystème se définit comme un système naturel ouvert composé de sous-systèmes qui entretiennent entre eux des relations.

L'écosystème pastoral est un système ayant été affecté ou manipulé par l'homme et le bétail pour leurs besoins propres. La gestion durable d'un tel système requiert alors la définition de plusieurs paramètres socio-bio-géographiques et celle de leurs interactions dans un cadre de processus décisionnel bien structuré. Dans cet environnement, l'homme et le bétail se concurrencent fortement pour le même espace tantôt exploité pour l'agriculture, tantôt pour le pastoralisme ou pour les deux à la fois. Cet espace n'étant pas extensible, des méthodes d'exploitation et de gestion répondant non seulement aux besoins de survie de ces deux protagonistes mais, aussi et surtout, conformes aux exigences de la conservation de la nature sont indispensables. Ce qui soulève plusieurs questions auxquelles le concept de gestion durable des ressources naturelles tente de répondre :

- quel niveau de production peut-on atteindre ?
- comment ce niveau de production influence-t-il l'environnement ?
- peut-on réaliser une forme d'élevage répondant aux besoins croissants de la population sans aucune influence néfaste et catastrophique sur l'environnement ?

De nos jours, l'une des préoccupations de la communauté scientifique internationale est l'utilisation et l'exploitation rationnelles des ressources naturelles pour un développement durable et soutenu. Dans un système de production donné, le concept de développement durable est lié à la capacité de celui-ci à maintenir son niveau de productivité presque égal ou supérieur à sa moyenne historique déterminée par son niveau de variabilité historique (Lunam and Robert, 1989). Ce qui signifie, entre autres, que les ressources naturelles doivent être

conservées et le milieu environnemental préservé. Les générations futures devraient pouvoir satisfaire leurs besoins essentiels autant que le font les générations présentes.

Pour relever ce défi, l'aspect dynamique dans l'espace et dans le temps constitue un facteur important à considérer, car les écosystèmes changent continuellement sous l'action combinée de divers facteurs. Il faut, par exemple, comprendre les dynamiques pour apprécier la tolérance du milieu vis-à-vis des interventions humaines le plus souvent complexes. La modélisation et la simulation des processus par lesquels les paramètres sont imbriqués ou interreliés constituent le moyen le plus efficace pour ce faire. Cependant, cela implique la considération d'un grand nombre d'intrants et de paramètres, et la traduction de leurs interactions à l'aide de systèmes d'équations plus ou moins complexes à variables souvent inconnues ou difficiles à évaluer dans le contexte sahélien.

1.1.3 Les modèles de simulation de la production des pâturages

Un modèle est une abstraction qui simplifie le système réel étudié en ignorant de nombreuses caractéristiques de ce système pour se focaliser sur les aspects qui intéressent le modélisateur et qui définissent la problématique du modèle. De ce fait, il est construit en fonction des objectifs assignés, déterminés par les hypothèses et le degré de simplification désiré. Pour Popper, cité par Coquillard et Hill (1997), un modèle doit satisfaire les points suivants :

- avoir un caractère de ressemblance avec le système réel;
- constituer une simplification du système réel;
- et enfin, le modèle est une idéalisation du système réel.

Il doit néanmoins reproduire le mieux possible, le comportement et le fonctionnement du système réel en fonction des objectifs fixés.

Sur le plan écologique, l'approche par simulation a été la plus utilisée. Les modèles de simulation combinent les connaissances sur les différents processus physiques et biologiques selon des théories pouvant être manipulées et extrapolées.

Dans le domaine des pâturages, plusieurs modèles ont permis de simuler la production de biomasse herbacée des prairies artificielles mais, pour la plupart, la simulation concerne un nombre limité d'espèces s'appliquant à des prairies artificielles monospécifiques, alors que les milieux naturels sont plurispécifiques. En général, les processus de production sont décrits et simulés selon l'approche par variables d'état. Celle-ci est basée sur le fait que l'état d'un système donné peut être quantifié à tout moment et que les changements de l'état peuvent être décrits par des systèmes d'équations permettant de relier différentes variables d'état. En dehors des processus liés à la croissance des plantes herbacées et à leur productivité qui ont reçu le plus d'attention, les processus liés à la photosynthèse, la germination et la sénescence ont été également simulés. Certains modèles très complexes comme SPUR (Simulation of Production and Utilization of Rangelands), développé par le USDA-ARS (Hanson *et al.*, 1988; Wight and Skiles, 1987) considèrent, en plus, d'autres facteurs tels que l'âge du tissu de la plante et la concentration d'azote dans le tissu. Le but de tels modèles est principalement de fournir une base de calcul pour évaluer les impacts des aménagements sur l'environnement et prédire les effets des changements climatiques sur les écosystèmes pastoraux en vue d'une base de décision par l'évaluation, l'optimisation des systèmes et pratiques d'amélioration des terres. En effet, SPUR est un modèle de simulation biophysique des pâturages à 5 composantes : croissance de la plante, hydrologie, animaux domestiques, animaux sauvages et économie (Carlson and Thurow, 1993) qui permet de simuler la compétition entre 7 espèces et l'impact de la pâture sur la végétation. Mais ce type de modèles très complexes, qui tentent de prendre en compte la complexité des systèmes réels, s'exposent aux risques de remplacer les systèmes complexes par un grand modèle tout aussi complexe et difficile à comprendre. En effet, les liens entre les composantes ne sont pas toujours bien établis (McNeil *et al.*, 1985). Ainsi, malgré des modifications introduites sur SPUR, Carlson et Thurrow (1996) ont relevé l'incapacité du modèle à prédire la réponse des espèces à croissance irrégulière suite aux interactions complexes des facteurs contrôlant leur croissance.

Par ailleurs, en zone sahélienne, l'absence de données détaillées (peu de recherche) reste un défi quasi permanent à relever. Ceci limite l'application des modèles du type SPUR qui, le plus souvent, requièrent des données établies sur une base d'observations journalières. En effet, pour certaines données, les stations d'observations sont non seulement peu

représentatives par rapport à la discontinuité du phénomène observé, mais aussi les conditions de collecte de ces données ne sont pas toujours idéales.

Certains modèles de simulation combinent les données de télédétection afin de minimiser ce problème de disponibilité de données. C'est le cas du modèle STEP (Sahelian Transpiration, Evaporation and Productivity model) (Mougin *et al.*, 1995, Lo Seen *et al.*, 1995) qui combine des mesures spectrales de télédétection avec un modèle décrivant les processus de fonctionnement de la végétation herbacée (espèces annuelles) de la région sahélienne en considérant le système sol-plante-atmosphère. Il modélise les flux hydriques dans le sol, l'évaporation, la transpiration, la photosynthèse, la respiration, la sénescence, la production et la décomposition de la litière à la surface du sol. Mais, là aussi, STEP requiert des données sur une base journalière qui, sous les conditions sahéliennes, ne sont disponibles (rarement) qu'en station. En outre, il ne considère que la production herbacée alors que la strate ligneuse constitue une base importante de la productivité des pâturages au Sahel. Celle-ci intervient en appoint dans l'alimentation des animaux (apport d'azote) notamment en saison sèche, bien que sa quantification constitue encore un problème.

De plus, les aspects socioéconomiques du milieu pastoral ne sont pas considérés dans la modélisation. Or, le but de cette recherche est de définir une architecture intégrant les principaux aspects importants du système pour mieux définir leur comportement et guider les aménagements nécessaires dans un souci de durabilité. Ainsi, même si certaines composantes du système sont considérées moins importantes et donc à ce titre quelque peu négligées, il faut pouvoir identifier les facteurs internes ou externes qui influencent le fonctionnement de l'écosystème afin de ne pas biaiser les résultats et compromettre les décisions à prendre : les aspects temporels et spatiaux doivent nécessairement être considérés dans la modélisation.

Par contre, dans leur approche de simulation de l'écosystème pastoral en zone semi-aride, Wu *et al.* (1996) ont combiné l'imprécision floue avec l'incertitude probabiliste pour étudier les interactions climat-plante-herbivore. Leur approche présente un double intérêt. Tout d'abord, l'approche prend en compte le caractère vague, imprécis ou flou des données numériques, linguistiques et les avis des experts du domaine. L'approche par la logique floue permet en

effet de définir des niveaux graduels d'appartenance d'un élément à un ensemble, ce qui évite la généralisation par une valeur unique. Ensuite, la variation de la charge animale potentielle par rapport à l'état du milieu est évaluée afin de proposer les aménagements qui s'imposent. Les résultats de leur simulation dans le temps ont montré la pertinence de leur approche. Cependant, celle-ci étant basée sur une zone homogène, une même valeur pour chacun des paramètres est considérée. Or, dans le milieu naturel, les paramètres comme la biomasse, les sols ou autres sont hétérogènes dans l'espace.

D'une manière générale, le défi à relever se situe à un double niveau : d'une part, il faut développer des approches capables de prendre en compte les problèmes évoqués plus haut et, d'autre part, ces méthodes doivent s'appuyer sur des données disponibles ou faciles à acquérir dans le contexte sahélien. Ce défi peut être cependant relevé si on utilise des outils offrant un cadre global d'intégration spatiale et temporelle des données de sources multiples comme les systèmes d'information géographique (SIG). L'intégration des données dans le SIG soulève aussi d'autres questions qui sont liées à la conversion des formats des données, à leur traitement et à leur extraction, et nécessite souvent de la généralisation pouvant résulter à des pertes d'information. De plus, les prédictions des impacts sont sujettes à des imprécisions et à des incertitudes qu'il convient de considérer en plus des erreurs liées aux données elles-mêmes. L'incertitude est une évaluation de notre croyance ou doute sur le résultat basé sur les données disponibles et ne relève pas toujours d'une erreur, tandis que l'imprécision est un élément de la donnée elle-même et se réfère à la donnée comme une gamme de valeurs possibles.

1.1.4 Le SIG comme outil d'aide à la décision

Un SIG peut être défini comme un système qui permet de décrire, gérer et analyser les objets par rapport à leur position, leur relation spatiale et leurs attributs et ce, dans un système de coordonnées géographiques. Les données dans un tel système, repérables dans l'espace, sont structurées de sorte à pouvoir extraire des synthèses utiles à la décision (Didier, 1990). Le SIG apparaît ainsi à la fois comme un outil de gestion et un outil d'aide à la décision dont le principe est de trouver la meilleure alternative de décisions permettant de solutionner un problème donné (Jankowski, 1995). La nature des alternatives est variable. Ces alternatives

peuvent s'exprimer sous formes d'actions, d'hypothèses relatives à un phénomène ou d'objets à assigner à un ensemble.

Cependant, quelle que soit l'alternative, l'acquisition des données constitue encore une composante coûteuse du SIG. De plus, disposer de données les plus précises possible pour assurer une aide à la prise de la bonne décision demeure un défi majeur pour la zone sahélienne. Il faut, une fois de plus, des méthodes ou approches appropriées telles que l'analyse multicritère et l'approche floue qui permettent, entre autres, de considérer plusieurs critères pour définir les alternatives et aussi de prendre en compte les erreurs. Le critère, formé de plusieurs paramètres indicateurs définis par un ensemble de variables, constitue l'élément de la base d'une décision et peut être évalué et mesuré.

Les images de télédétection permettent l'extraction de données sur certaines variables intéressant la gestion du milieu, notamment celles liées à la production des ressources végétales telles que la biomasse, principal critère de durabilité de l'écosystème pastoral. Elles constituent des formes d'information géoréférencée pouvant être intégrées dans les SIG en ce qui concerne les applications liées aux ressources naturelles (Hinton, 1996). En effet, combinées avec les techniques de modélisation, elles peuvent être utilisées comme source d'information primaire et augmenter notre compréhension de la variabilité spatiale des écosystèmes (Hanson *et al.*, 1992). Mais y accède-t-on assez aisément ?

1.1.5 Apport des données de télédétection et leur accès

D'une manière générale, la télédétection est un outil permettant d'extraire l'information contenue dans l'onde électromagnétique émise ou réfléchi par un objet ou cible vers un capteur (avion, satellite). Le capteur reconstitue l'énergie détectée en un signal électrique pouvant être visualisé (une image) et analysé. L'acquisition en temps réel de ce type de données rehausse leur importance pour la base de données et l'aide à la décision. Ainsi, les bandes thermiques ont servi à la cartographie de la température de surface, au suivi des feux de brousse, tandis que des indices de végétation calculés par combinaison ou simple rapport des bandes du visible ont été utilisés entre autres, pour l'étude qualitative et quantitative de la végétation (Miller *et al.*, 1986; Townshend and Justice, 1986; Malingreau *et al.*, 1989). Une

bonne revue des indices est donnée par Bannari et *al.* (1995). Parmi ces indices, le NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) est sans doute l'indice le plus utilisé au Sahel pour la quantification et le suivi temporel de la végétation (Curran, 1983; Asrar et *al.*, 1984; Tucker and Sellers, 1986; Tucker, et *al.*, 1985; Wylie et *al.*, 1992) : établissement de corrélation entre NDVI et les caractéristiques des couverts végétaux comme le LAI (Leaf Area Index), l'efficacité d'interception de la radiation photosynthétiquement active et la biomasse sur pied des pâturages.

Toutefois, ces relations le plus souvent linéaires, restent dépendantes du site et de la période de l'étude. Par ailleurs, d'autres paramètres comme la nature du sol, sa composition et son taux d'humidité influencent de manière significative ces relations (Williamson, 1989; Escadafal et Huete, 1991; Huete et *al.*, 1994). Il en est de même de la pâture (Davis et *al.*, 1992) et de la topographie (Friedl et *al.*, 1994).

L'apport des données de télédétection dans les SIG dépend non seulement de leur nature et de leur résolution, mais aussi de l'échelle de la modélisation. À l'échelle globale et régionale, l'utilité de la télédétection dans l'étude spatiotemporelle de la végétation a été démontrée par plusieurs études. Celles-ci ont permis le suivi et l'évaluation des changements de la surface terrestre. Parmi les données de télédétection disponibles de nos jours, les données du satellite TIROS-NOAA ont été les plus utilisées dans l'optique de la gestion des ressources naturelles. Ces satellites offrent une large vue synoptique grâce à leur faible résolution, ce qui favorise la manipulation de volumes importants de données et permet de mener des études environnementales globales. Un autre grand avantage est leur coût qui reste relativement faible et accessible.

Malheureusement, ceci est loin d'être le cas pour les évaluations à l'échelle locale qui exigent des données de plus haute résolution (images SPOT, LANDSAT ou RADARSAT). Cette situation est particulièrement sensible pour les pays en voie de développement où leur accès reste économiquement et techniquement assez limité. D'une part, leur coût élevé limite leur acquisition aux seuls projets financés par l'aide extérieure. D'autre part, ces images sont souvent non disponibles car elles requièrent souvent la pré-programmation pour leur

acquisition ou même leur archivage. Ces données restent donc inaccessibles. Ceci soulève une fois de plus la question des méthodes d'exploitation : il faut nécessairement développer des approches permettant leur utilisation sur une base périodique et non continue afin de minimiser les coûts. D'où l'importance de la simulation et de l'intégration de données multiples, objet de la présente recherche.

1.2 Objectifs et portée de la recherche

La présente recherche a pour finalité de contribuer à l'amélioration de la gestion du milieu pastoral sahélien et au développement durable dans le cadre d'une utilisation soutenable des ressources naturelles. Elle vise, en effet, à développer une approche du suivi environnemental pastoral sahélien dans un cadre systémique faisant appel à la géomatique.

1.2.1 L'objectif scientifique principal

L'objectif scientifique principal de cette recherche est la mise au point d'une architecture d'intégration de données socio-bio-géographiques et de données satellitaires dans un Système d'Information Géographique (SIG) en vue de favoriser l'aide à la prise de décisions dans la gestion du milieu pastoral sahélien.

1.2.2 Les objectifs scientifiques spécifiques

De manière spécifique, la présente recherche vise à :

- cerner les paramètres pertinents de productivité des écosystèmes pastoraux sahéliens et les critères de durabilité de leur exploitation;
- analyser le modèle physique de Wu et *al.* (1996) et l'adapter au milieu pastoral sahélien pour prédire sa productivité et évaluer ses variations; l'adaptation est basée sur la prise en compte des données socioéconomiques dans les intrants du modèle;
- développer une approche qui servirait de soupape au système de gestion de l'espace

pastoral sahélien et contribuerait à minimiser les coûts d'acquisition des données grâce à la capacité de prévision qu'elle offre en tenant compte de la charge animale pour évaluer l'état du milieu. En effet, elle devrait être une voie économique pour la prévision de la biomasse primaire par unité pastorale (UP). La conjugaison des données de télédétection (indice de végétation calculé à partir des domaines spectraux du visible et du proche infrarouge) avec les données socioéconomiques et physiques in situ à l'aide d'analyse spatiale, aboutirait à des propositions de scénarios d'aménagements et de gestion dans le cadre de la prise de décisions;

- offrir des possibilités de définition de zones et circuits de transhumance pour l'accès à l'eau et aux pâturages sans risques majeurs de dégradation du milieu.

1.3 Les hypothèses de recherche

La présente étude cherche à valider les hypothèses suivantes :

- il est possible d'appliquer un modèle de simulation, en l'occurrence le modèle de Wu *et al.* (1996), au milieu pastoral sahélien pour prédire sa productivité et évaluer les variations;
- l'intégration des paramètres socioéconomiques à ce modèle permet d'améliorer les résultats de prévision et de mettre en place des programmes de gestion appropriés;
- une approche par hiérarchisation multicritère permet d'évaluer les paramètres socioéconomiques intrants du modèle;
- les données de télédétection sont utiles pour l'aménagiste. Combinées avec les données bio-géographiques et socioéconomiques du milieu, elles peuvent être intégrées dans les SIG selon une approche dynamique pour fournir des éléments d'aide à la décision et de mise en œuvre de politiques de développement durable.

1.4 Les applications envisagées de la recherche

Les applications envisagées de cette recherche sont très diverses :

- définition de systèmes de gestion des terroirs sahéliens;
- alerte précoce : évaluation quantitative et qualitative de la matière fourragère disponible, prévision des apports en suppléments d'aliments de bétail en cas de sécheresse, organisation de la transhumance;
- gestion de l'environnement;
- développement durable.

1.5 Organisation de la thèse

La thèse est organisée en trois parties.

La première partie est composée des chapitres 2 et 3. Elle fait état des fondements conceptuels et théoriques sur lesquels nous nous sommes appuyés. Étant donné la complexité du sujet, une synthèse bibliographique est présentée dans le chapitre 2 sur la théorie écologique et la simulation des écosystèmes. Dans cette partie, il est également fait état des outils d'analyse que constituent les SIG (avantages et limites). Le chapitre 3 analyse les différents paramètres de productivité de l'écosystème pastoral.

La deuxième partie de la thèse présente le cadre conceptuel et méthodologique qui a été développé dans le cadre de cette recherche.

Enfin, la dernière partie présente les résultats de la recherche et comprend 3 chapitres. Le chapitre 5 fait l'état des résultats de la simulation notamment la biomasse primaire. Il analyse et interprète ces résultats à l'aide d'analyses de sensibilité et de validation du modèle. Le chapitre 6 présente les scénarios de gestion et les zones potentielles d'accueil pour la transhumance. Enfin, le chapitre 7 présente les principales conclusions ainsi que les apports scientifiques de la recherche et les recommandations.

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de donner un aperçu des notions de base en matière d'écologie, de simulation écologique et de développement durable. Les fondements des outils de SIG et de télédétection appliquée au domaine des ressources pastorales sont également exposés. Pour ce faire, nous aborderons la théorie en matière d'écologie afin de faire ressortir les besoins de modélisation et de simulation. L'accent est porté sur les modèles de simulation des écosystèmes pastoraux qui constituent le domaine d'application de la présente recherche. Les principaux concepts et principes majeurs seront revus et analysés afin de fournir un état de l'art dans ce domaine. Par ailleurs, le but fondamental de notre recherche étant l'évaluation des ressources naturelles dans le cadre d'une gestion durable de l'écosystème, le concept de développement durable sera également abordé d'un point de vue théorique et pratique pour aboutir au concept des SIG et d'approche floue pour une spatialisation réaliste des données à intégrer dans le SIG. Enfin, les objectifs et concepts fondamentaux des méthodes d'aide à la décision seront présentés dans le cadre de la définition des méthodes de gestion appropriées.

2.2 Concepts de base en écologie

L'écologie a été initialement définie comme "la science de l'habitat" qui étudie les êtres vivants dans leur habitat naturel selon les biocénoses (assemblages d'espèces). Le biotope était le milieu dans lequel se développait la biocénose, tandis que l'écosystème représentait l'addition des deux : $\text{écosystème} = \text{biocénose} + \text{biotope}$. Cette définition a évolué et, de nos jours, elle correspond à l'étude des interactions entre les organismes vivants et le milieu, et des organismes vivants entre eux dans les conditions naturelles. Selon Frontier et PichodViale (1993), l'écosystème traduit un système complexe d'interactions des espèces entre elles et

entre les espèces et le milieu selon la théorie des systèmes, celle-ci étant fondée sur 3 catégories de propriétés :

- les éléments du système dépendent les uns des autres dans leurs fonctionnements et leurs évolutions;
- les parties du système s'intègrent entre elles en un ensemble organisé et il en résulte l'émergence d'un niveau macroscopique défini par rapport au niveau microscopique des éléments constitutants (émergence de propriétés globales);
- le système agit sur les propriétés, le fonctionnement et l'évolution du système.

Le concept d'écosystème permet ainsi de démontrer les relations ou l'interdépendance des composantes d'un système donné plutôt que de délimiter un ensemble d'espèces sur une zone géographique donnée. Les organismes et les facteurs abiotiques qui le composent ont chacun leur propre forme de distribution en relation avec l'espace et le temps, ainsi qu'une structure de relations fonctionnelles entre les composantes. Dans ce contexte, la définition de l'écosystème est déterminée par l'intérêt de celui qui veut l'investiguer (Begon et *al.*, 1986).

Sur le plan pastoral, l'écosystème comprend le végétal et l'animal, ce dernier étant manipulé par l'homme pour atteindre des objectifs de production spécifique. L'aménagement pastoral implique, en quelque sorte, la régulation de la consommation du végétal par le bétail pour l'énergie et les éléments nutritifs nécessaires à son développement (Briske et Heitschmidt, 1993). L'état d'un écosystème dépend, en effet, du flux d'énergie solaire et du cycle nutritionnel, notamment celui de l'azote. À la base, l'énergie solaire est captée soit par des producteurs primaires puis transférée à travers un ou plusieurs niveaux de consommateurs pour former la chaîne alimentaire des herbivores, soit directement par un décomposeur (bactérie ou champignon) pour former, en l'absence d'herbivores, la chaîne des détritiques alimentaires. Le flux d'énergie et le cycle de l'azote au sein du système écologique sont influencés par la pâture. Ceci se traduit par une augmentation de la minéralisation favorisant l'activité microbienne et une accélération du taux de conversion de la forme organique (aminoacides et protéines) à celle inorganique (nitrates et ammonium) (Frontier et Pichod-Vale, 1993). La pâture modifie aussi le taux et la forme d'énergie en influençant la

disponibilité en éléments nutritifs qui gouverne en retour l'efficacité des organismes à acquérir et à traiter l'énergie. Cependant, les lois thermodynamiques qui gouvernent les flux d'énergie au niveau de l'écosystème pourraient laisser croire que la biomasse produite est sans limite étant donné la production continue de l'énergie solaire. En effet, une de ces lois stipule que «l'énergie peut se transformer d'une forme à une autre mais ne peut être ni créée ni détruite; l'énergie est transférée de la chaîne alimentation des herbivores à celle de détritits (déchets) alimentaire par les fécès et le tissu animal mort ».

Or, les processus de transformation de l'énergie ne sont pas efficaces à 100 % et de nombreuses contraintes limitent les productivités primaire et secondaire de l'écosystème pastoral. La productivité primaire traduit la croissance de la plante par unité de surface et par unité de temps (kg.ha-1.an-1). Brisque et Heitschmidt (1993) ont résumé les contraintes à ce niveau en deux catégories :

- l'inefficacité dans la capture de la radiation solaire au niveau de la surface terrestre pour la photosynthèse (45 %);
- les facteurs abiotiques qui empêchent la maximisation de l'énergie solaire captée (moins de 1 % convertie en production primaire (Begon et *al.*, 1986)). Ces facteurs comprennent l'eau, la température ainsi que les éléments nutritifs.

La productivité secondaire exprime la croissance de l'animal par unité de surface et par unité de temps et peut être traduite par la quantité de viande ou de lait produite. À ce niveau, l'impossibilité des animaux à consommer toute la production primaire (racines et ligneux notamment) et la qualité de la biomasse primaire déterminent les rendements. D'après Stanton (1988), seulement 20 % de la production primaire est consommée si on considère que 60 à 90 % de cette production se trouve dans les racines et que 50 % de la biomasse sur pied est pâturée. De cette énergie ingérée, environ 10 % seulement sera convertie en production secondaire, ce qui reste relativement assez faible.

Afin de maximiser la production animale sur une base soutenable, il est important de considérer tous les facteurs abiotiques. Plus précisément, en zone aride ou semi-aride comme

le Sahel, la variation climatique détermine la variabilité temporelle et spatiale de la production primaire et secondaire. Par ailleurs, les besoins nutritionnels des herbivores et le comportement du fourrage pour acquérir l'énergie et les nutriments doivent être compris afin d'évaluer de manière adéquate la production animale : c'est ce à quoi s'attellent les méthodes de modélisation.

2.3 Fondements de la modélisation et de l'art de simulation des écosystèmes pastoraux

Pendant longtemps, l'écologie descriptive a tenté de saisir la complexité du fonctionnement des écosystèmes. Cela passe par la compréhension des multiples interactions et rétroactions au sein de tels systèmes. En effet, la modélisation écologique date du 18^e siècle avec le développement des modèles analytiques qualifiés de déterministes, simples et continus dans le temps. Ces modèles constituent encore de nos jours des bases de recherches théoriques et appliquées. Le modèle logistique de Verlhust et le modèle proie-prédateur de Lotka-Volterra des années 1920 sont de ceux-là. Ces deux modèles reposent sur des équations différentielles théoriques pouvant être résolues : ce sont des modèles continus dans le temps et l'espace.

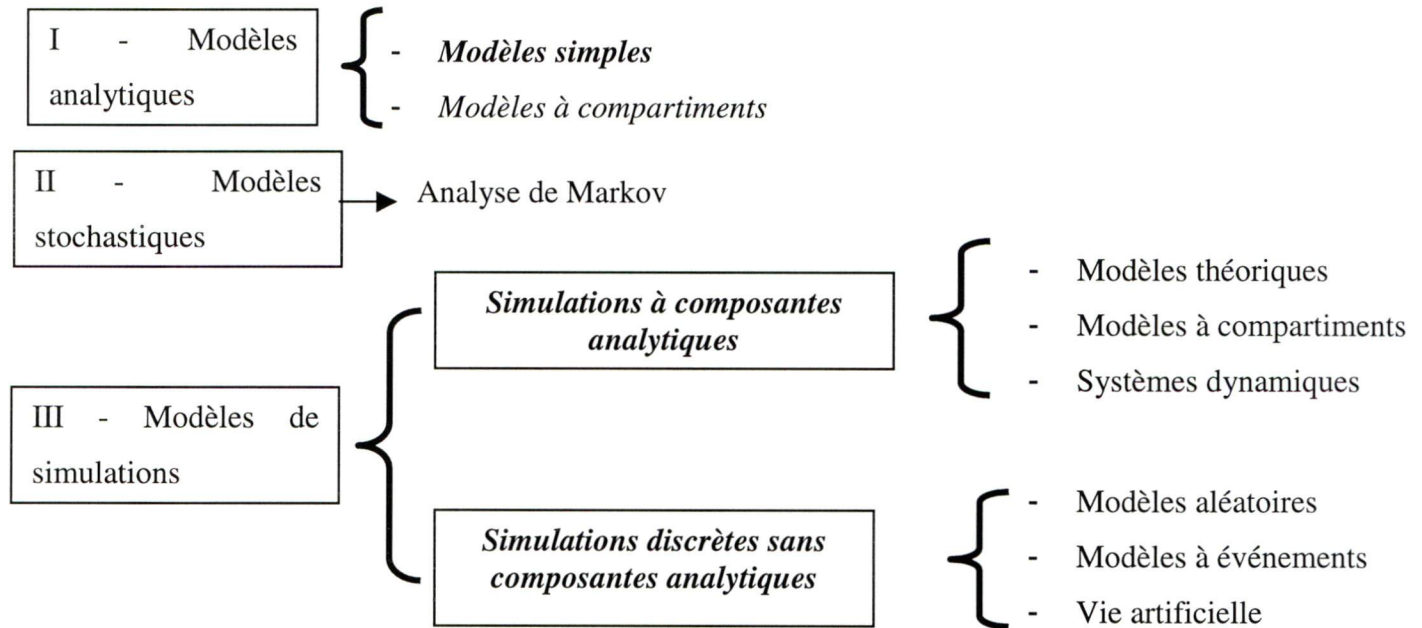
Les techniques de modélisation peuvent être regroupées en trois catégories (figure 1) selon la taxonomie de Coquillard et Hill (1997) :

- les modèles analytiques ou déterministes qui s'appuient sur un formalisme mathématique pur;
- les modèles purement stochastiques telle l'analyse de Markov faisant appel aux probabilités;
- les modèles de simulation pouvant être purement déterministes ou stochastiques ou même hybrides.

La simulation est une plongée du modèle dans le temps. Elle consiste à faire une abstraction d'un système au cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques

dans le but d'évaluer différentes décisions. La simulation doit respecter deux principes fondamentaux : celui de causalité et celui de déterminisme. Le principe de causalité implique que le futur ne peut pas influencer le passé, tandis que le déterminisme stipule que le futur du système peut être déterminé à partir de son état actuel et de son passé.

Figure 1 : Techniques de modélisation écologique



2.3.1 Les modèles analytiques ou déterministes

Ils comprennent les modèles dits simples et les modèles à compartiments.

2.3.1.1 Les modèles simples

Parmi les modèles simples, le modèle logistique et le modèle proie-prédateur sur lequel s'inspire le modèle plante-herbivore constituent les modèles les plus utilisés.

- Le modèle logistique

Le modèle logistique modélise la croissance d'une population en fonction du taux de reproduction (équation 2.1).

$$Po(t) = \frac{Po_{\max}}{1 + e^{-\gamma - r(t)}} \quad \text{équation 2.1}$$

$$\text{avec } r = \frac{Po_{(t+1)} - Po_{(t)}}{Po_{(t)}} \quad \text{équation 2.2}$$

r = taux de croissance

Po_{\max} = valeur maximale à laquelle la population se stabilise

γ = paramètre pour lequel :

$$e^{-\gamma} = \frac{Po_{\max} - Po_{(t)}}{Po_{(t)}} \quad \text{équation 2.3}$$

Po = population

t = temps

Mais les hypothèses de base qui sous-tendent cette approche de modélisation restent critiquables (Coquillard et Hill, 1997). En effet, le modèle admet que tous les individus sont potentiellement reproducteurs, ce qui est rarement le cas. Par ailleurs, cette approche estime qu'une population peut être caractérisée par un taux de reproduction devant varier de manière à ce que la population se stabilise à un effectif correspondant aux capacités maximales d'accueil du milieu dans lequel elle évolue (espace, alimentation). La croissance jusqu'au maximum est modélisée en fonction de ce palier maximum. Il est donc supposé que la valeur limite maximale de la population est constante, ce qui ne tient pas compte des processus de compétition entre espèces et le freinage de la multiplication exponentielle peut être perçu comme une «résistance du milieu».

De plus, le taux de croissance tel que défini par l'équation 2.1 n'est acceptable que pour une population en phase de croissance exponentielle. Un terme de régulation appelé «autolimitation» correspondant à un coefficient de croissance instantanée proportionnel à la différence relative a été alors introduit afin de considérer ces insuffisances.

Le modèle logistique reste néanmoins la base des développements de nombreux modèles écologiques notamment en matière de modélisation dynamique à deux systèmes tels que le système plante-herbivore basé sur le modèle proie-prédateur.

- Le modèle proie-prédateur et la modélisation du système plante-herbivore

L'approche de modélisation proie-prédateur constitue, avec le mutualisme et la compétition, l'un des trois principes de base pour la modélisation des interactions entre deux populations (May, 1981). Elle se base sur le principe (- +) dans le cas où les effets d'une population donnée sur une autre sont tels que le taux de croissance de l'une diminue lorsque celui de l'autre augmente. Le mutualisme (principe + +) traduit l'amélioration réciproque des taux de croissance des deux populations, tandis que l'approche selon la compétition (principe - -) modélise les situations où les taux de croissance diminuent suite à la coexistence des deux espèces.

Les systèmes pastoraux les plus communs sont ceux où le taux de changement des herbivores est une fonction de la densité des plantes et vice versa. C'est donc la modélisation par l'approche proie-prédateur qui permet de déterminer les interactions entre les deux. Le modèle proie-prédateur est réalisé à l'aide d'équations différentielles (équations 4 & 5) décrivant chacune la variation de la population concernée dans le temps en relation avec l'autre population. Ce type de modèles associe de manière assez simple la croissance et la reproduction des populations en s'appuyant sur les modèles de croissance logistique. Ainsi, la population des proies présente une propension de croissance exponentielle illimitée, r , mais limitée par la prédation : l'effet des prédateurs sur la population proie est mesuré par un terme de réponse fonctionnelle ($P_{\text{préd}}P_{\text{proie}}$). La mortalité et les interactions entre proies et prédateurs ou compétiteurs pour une même ressource sont également considérées, ce qui rend ces modèles attrayants pour modéliser les interactions entre diverses espèces. En effet, la population de prédateurs est modélisée en considérant un taux de mortalité intrinsèque et un taux de croissance ou réponse numérique qui dépend de l'abondance des proies ($P_{\text{préd}}P_{\text{proie}}$). En d'autres termes, les prédateurs montrent une mortalité exponentielle en l'absence de proies, tandis qu'en leur présence, la population de prédateurs augmente à un taux proportionnel au taux de rencontres, soit le produit $P_{\text{préd}}P_{\text{proie}}$ qui définit l'interaction des deux populations.

$$\frac{dP_{\text{O}_{\text{préd}}}}{dt} = rP_{\text{O}_{\text{préd}}} - \alpha P_{\text{O}_{\text{préd}}} P_{\text{O}_{\text{proie}}} \quad \text{équation 2.4}$$

$$\frac{dP_{\text{O}_{\text{proie}}}}{dt} = -mP_{\text{O}_{\text{proie}}} + \beta P_{\text{O}_{\text{préd}}} P_{\text{O}_{\text{proie}}} \quad \text{équation 2.5}$$

$P_{\text{O}_{\text{préd}}}$ = population des prédateurs,

$P_{\text{O}_{\text{proie}}}$ = population des proies,

m = taux de mortalité,

β = taux de croissance des prédateurs en fonction de l'abondance des proies,

α = effet des prédateurs sur les proies.

Le principe du modèle proie-prédateur est donc basé sur une tendance oscillatoire : de fortes densités de proies tendent à produire de fortes densités de prédateurs qui diminuent la densité de proies, entraînant de fortes densités de proies et ainsi de suite. Cela suppose que le prédateur répond indéfiniment à l'augmentation de la densité de la proie et qu'il ne peut y avoir d'effets de saturation. Ce qui n'est pas le cas.

La modélisation du système plante-herbivore s'inspire du modèle proie-prédateur, mais en tenant compte des effets de saturation. Le taux d'accroissement de la proie est représenté par le modèle logistique et le terme décrivant la croissance des prédateurs est modifié. En effet, la réponse fonctionnelle et la réponse numérique de la 'collision binaire' sont modifiées par la prise en compte de la dépendance de la densité. La réponse fonctionnelle exprime la relation entre la densité de végétation et le taux de pâture, tandis que la réponse numérique décrit la relation entre la densité de végétation et le taux d'accroissement des herbivores (Caughley, 1981).

D'une manière générale, les systèmes pastoraux sont modélisés selon deux principes : l'interaction et la non interaction. La figure 2 montre la classification de ces systèmes basée sur la division dichotomique de Monro citée par Coquillard et Hill (1997).

Dans le système non-interactif composé de deux classes, l'herbivore n'influence pas le taux de renouvellement des ressources végétales. Cette approche ne s'appliquant pas à notre sujet, nous ne nous y attarderons pas.

Par contre, dans le système interactif, le taux de variation des herbivores est fonction de la densité des plantes et vice versa, et la dynamique y est complexe. Deux types de systèmes existent : le système «laisser-faire» et le système interférentiel. Dans le premier cas, on considère qu'il n'existe pas d'interférence entre les herbivores dans la recherche de leur alimentation. Ici, on modélise les populations en admettant que le taux d'accroissement des herbivores est une fonction aussi bien de la densité de la végétation que de celle des herbivores. Selon les valeurs des paramètres, le système peut être caractérisé par un point d'équilibre stable ou par un cycle limite stable dont l'amplitude peut être très sévère à conduire à l'extinction. Sa modélisation fait intervenir plusieurs paramètres relatifs à la plante et à l'herbivore (particularisation du système proie-prédateur au système proie-prédateur) : elle repose d'une part sur le principe de la croissance logistique (avec le terme de l'autolimitation) ou coefficient de croissance instantanée de la végétation et, d'autre part, sur la rusticité de l'herbivore, c'est-à-dire sa capacité de survie et de reproduction intrinsèque (équations 2.6 et 2.7). Ces modèles sont utilisables avec les SIG, en particulier lorsque les variables spatiales sont sous forme de cartes (Goodchild et *al.*, 1993).

$$\frac{dV}{dt} = r_v V \left(1 - \frac{V}{V_{\max}}\right) - B_H H (1 - e^{-d_1 V}) \quad \text{équation 2.6}$$

$$\frac{dH}{dt} = H \left\{ -m + c_H \left[1 - e^{-d_2 V}\right] \right\} \quad \text{équation 2.7}$$

$V \left(1 - \frac{V}{V_{\max}}\right)$ = terme représentant l'autolimitation,

r_v = taux de croissance intrinsèque de la végétation,

V_{\max} = biomasse primaire maximal,

V = biomasse primaire,

B_H = besoin de l'herbivore,

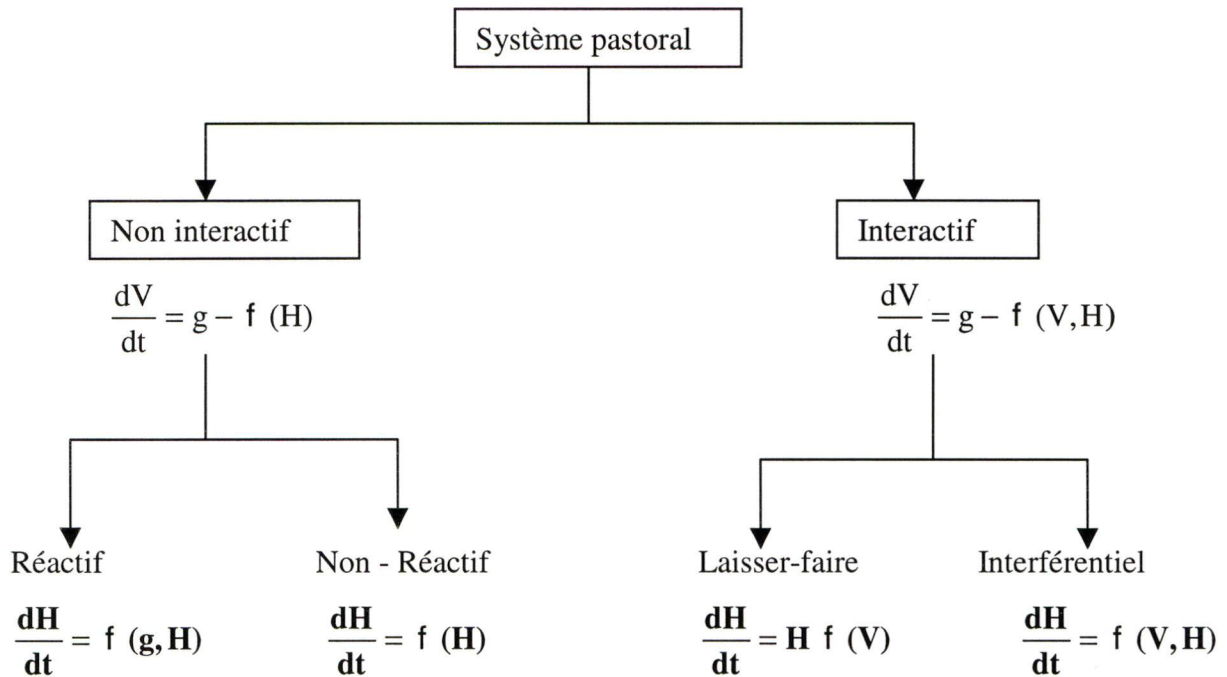
d_1 = efficacité de la pâture en cas de rareté de la végétation,

m = taux de mortalité (ici déclin des herbivores en cas de non disponibilité de la végétation),

c_H = taux de reproduction intrinsèque de l'herbivore,

d_2 = efficacité démographique de l'herbivore en période de pénurie de la végétation.

Figure 2 : Classification du système pastoral selon Caughley (1975)



V = biomasse primaire (production végétale),

H = production secondaire (charge animale),

g = taux de renouvellement des ressources végétales,

t = temps.

2.3.1.2 La modélisation par compartiment

Cette technique de modélisation est basée sur le découpage de l'ensemble du système en sous-unités dont les évolutions respectives sont interdépendantes. Ces modèles s'adressent aux processus de transfert de flux d'énergie et de biomasse entre les populations. Ils servent principalement à établir des bilans nets des échanges d'une catégorie d'individus ou d'une biocénose avec le milieu dans lequel elle interagit. L'environnement est, dans ce cas, compartimenté afin d'évaluer les flux des acteurs représentés de l'écosystème, c'est-à-dire les producteurs de matière organique (végétaux capables de synthétiser des éléments nutritifs du sol, du gaz carbonique et de l'air) et les consommateurs (herbivores, carnivores d'ordre 1 et 2). Le modèle logistique peut s'appliquer à chaque population en considérant la valeur limite des effectifs comme une fonction de flux représentant les ressources.

2.3.2 Les modèles stochastiques

Les modèles stochastiques sont des modèles probabilistes basés sur des processus aléatoires. Ils rendent compte de l'état du système à des instants distincts et successifs. L'analyse Markovienne en est un exemple. Une chaîne de Markov homogène à états finis d'ordre I se définit comme un processus aléatoire discret à états finis (Coquillard et *al.*, 1993). L'espace d'état est fini et connu.

2.3.3 La modélisation par simulation

La simulation peut être discrète ou continue. La simulation discrète est une technique utilisant un modèle où le temps est discrétisé et qui permet de considérer les effets spatiaux. Son principal avantage est la possibilité de décrire sous forme d'algorithme, le fonctionnement du système pas à pas dans le temps. L'algorithme exprime les relations entre un ensemble de variables discrètes (stochastiques ou non) et de paramètres. Les variables décrivant le système sont mises à jour pas à pas en suivant l'algorithme, sachant que l'utilisation de différentes techniques statistiques est nécessaire.

La simulation continue implique que les modèles utilisés soient continus dans l'espace et le temps. Or dans l'écosystème, les processus sont continus dans le temps mais discrets dans

l'espace d'état qui représente les phases. Le processus peut être décrit par une variable aléatoire prenant des valeurs finies. On considère que le système se trouvant à l'un des états possibles à l'instant t ne peut évoluer que vers l'un des états voisins à l'instant $t+1$. Un pas de temps de calcul en concordance avec le fonctionnement du système étudié permet de prendre en compte le caractère discret de l'espace d'état.

Pour l'aménagement pastoral en milieu semi-aride où la végétation active s'observe annuellement, un pas d'un an est appliqué lors de sa modélisation. Les techniques de simulation réalisées à ce niveau combinent des modèles à composantes discrètes et à composantes continues (équations différentielles). Les modèles discrets couplés à des modèles analytiques sont classés parmi les simulations hybrides, tandis que les modèles mixtes associent indifféremment les techniques discrètes avec les techniques de simulation continue ou bien de Monte-Carlo. La technique de Monte-Carlo consiste à résoudre un problème non probabiliste complexe grâce à l'utilisation d'un processus qui satisfait les relations du problème déterministe.

D'une manière générale, la simulation déterministe offre une approche globalisante du fonctionnement de l'écosystème du fait de sa simplicité de mise en œuvre et offre des résultats quantitatifs, mais présente aussi des limites. Du point de vue conceptuel, son utilisation suppose une homogénéité ainsi qu'une isotropie des propriétés du système, ce qui n'est pas possible car les individus du système sont en interaction dans le temps et dans l'espace. De plus, dans les approches déterministes ou stochastiques, les phénomènes spatiaux sont difficiles à intégrer même pour un haut niveau d'abstraction ou de réductionnisme. Au regard de tous ces éléments, une combinaison des approches constitue la meilleure voie pour évaluer le milieu pastoral.

4 Développement durable des milieux sahéliens

2.4.1 Qu'est-ce que le développement durable?

Le concept de développement durable est né des nombreux problèmes environnementaux tant à l'échelle locale, régionale et mondiale qui font de plus en plus l'objet d'observations et de

recherches. Ce concept a connu une plus grande considération depuis les années 1980. Sa consécration par la communauté scientifique internationale en 1987 au Sommet de Rio (Agenda 21 : Notre avenir à tous) l'a porté à la place qui lui revient. Des termes comme «la durabilité», «l'utilisation durable des ressources naturelles» sont devenus très populaires, englobant des sujets très divers tant au niveau des décideurs que des acteurs du développement.

Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs (Notre avenir à tous (1987)). Cette définition implique la prise en compte de multiples aspects touchant l'écologie, la sociologie et l'économie dans l'optique d'assurer un progrès durable. Ce progrès consisterait à laisser les systèmes naturels dans un état suffisamment bon pour permettre l'accroissement continu du bien-être social et économique dans un avenir prévisible, c'est-à-dire en tenant compte des limites de l'environnement. Du point de vue agropastoral, il s'agit donc d'utiliser, d'exploiter et de gérer les ressources naturelles de manière à produire de la nourriture, des fibres et des protéines pouvant couvrir les besoins des producteurs et des consommateurs dans le long terme. Les nombreuses recherches menées dans ce domaine couvrent plusieurs axes définis par Yunlong et Smit, (1994) :

- les implications et les effets des changements sur le milieu;
- les interactions des différentes composantes du système agricole;
- la perspective du suivi à long terme et l'orientation politique;
- le développement de concepts et de méthodes s'adressant à la complexité du système agricole.

Ceci rejoint l'analyse de Allen et *al.* (1991) qui argumentent que les perspectives de durabilité à long terme des systèmes agricoles dépendent de l'accent porté sur un aspect donné de la durabilité. Ils ont, pour ce faire, différencié deux aspects principaux : la durabilité en termes de conservation des ressources et de profit, et la durabilité en termes de pression sociale.

L'agriculture durable est aussi considérée comme une «stratégie de gestion» dont l'objectif

serait de réduire les coûts des intrants, de minimiser les dommages environnementaux et d'assurer une production et un profit dans le temps. Quant à MacRae et *al.* (1989), ils notent que l'agriculture durable doit être caractérisée principalement par des produits et pratiques qui minimisent la dégradation environnementale. Harwood (1990) définit l'agriculture durable selon trois principes : 1) l'interrelation de toutes les parties du système agricole incluant le fermier et sa famille, 2) l'importance des équilibres biologiques dans le système, et 3) le besoin de maximiser l'utilisation du matériel et des pratiques qui minimisent la rupture de ces relations. Cette notion de durabilité est aussi traduite en termes d'alternative. Elle rejoint la définition de l'agriculture alternative qui correspond à une production d'aliments et de fibres, et qui utilise à la fois les stratégies écologiques de production pour réduire les intrants et les dommages environnementaux. Il s'agit d'une agriculture qui favorise la production de profit et qui est efficiente à long terme.

De manière générale, les définitions de la durabilité diffèrent selon les auteurs et surtout en rapport avec les aspects qui sont privilégiés : aspect écologique, social ou économique. La définition écologique de la durabilité met l'emphase sur les processus biologiques, la productivité et le fonctionnement continu des écosystèmes (Yunlong et Smit, 1994). La dimension sociale de la durabilité, quant à elle, s'adresse à la satisfaction continue des besoins de base des humains, nourriture et abris, de même que les niveaux plus élevés des nécessités sociales et culturelles. Celles-ci concernent la sécurité, l'équité, la liberté, l'éducation, l'emploi et même la récréation dans les sociétés développées (Altieri, 1989). Du point de vue économique, la durabilité s'adressera en priorité au bénéfice à long terme de la production : rendements, performance économique et viabilité de la production.

Toutes ces définitions ont un objectif commun qui reste la vision du long terme en matière de production et d'utilisation des ressources naturelles pour le bien-être social des êtres humains. Les processus essentiels des interactions complexes et dynamiques des systèmes (écosystèmes et systèmes humains) doivent donc être compris. Pour notre part, ce défi de comprendre et de répondre de manière adéquate aux systèmes complexes implique à la fois une anticipation et une adaptation des stratégies d'aménagement dans une vision de durabilité incluant toutes les perspectives (écologique, sociale et économique). L'intégration de ces éléments ne peut se

faire que dans un cadre bien structuré permettant d'assurer des prises de décisions pertinentes.

2.4.2 Quelles perspectives de développement durable pour la zone sahélienne?

Dans les conditions sahéliennes, développement durable rime avec écologie, agropastoralisme et sécurité alimentaire. D'ailleurs, un des trois objectifs fondamentaux de «Notre avenir à tous» pour les pays en voie de développement, est l'amélioration du bien-être économique et de la qualité de vie. En effet, si les questions de gestion environnementale à l'échelle mondiale soulèvent des questions liées à la pollution ou à la contamination des eaux par les déchets (industriels ou agricoles), pour ces pays, notamment ceux de la zone sahélienne, la survie est un combat quotidien : la sécurité alimentaire et la capacité de charge constituent encore les éléments de la dimension sociale et économique de la durabilité (Smit et Smithers, 1994). Ils sont en relation directe avec le statut écologique du milieu, lui-même étroitement lié au climat et au milieu physique. La fragilité de ce milieu soumis à une exploitation sans relâche de ses maigres ressources demeure une préoccupation importante du concept de durabilité visant la survie pour les générations futures. Les changements climatiques, la dégradation des sols et la désertification se renforcent mutuellement.

La Banque Mondiale (1996) a proposé un agenda pour l'Afrique sub-saharienne dans le cadre de l'ESD (Environmental Sustainable Development). Selon cet agenda, plusieurs défis doivent être relevés afin d'atteindre le développement durable. Il s'agit entre autres :

- d'établir une sécurité alimentaire à travers des technologies agricoles et piscicoles tout en maintenant le capital naturel en termes de potentiel de production, de fertilité de sols et de biodiversité dans le contexte de variabilité climatique;
- de gérer l'énergie, l'eau et l'utilisation des autres ressources naturelles de manière à assurer une durabilité à long terme;
- de faciliter une transition démographique pour un niveau de population plus stable et une pyramide d'âges plus équilibrée;
- de rendre l'urbanisation plus soutenable en renforçant les aspects positifs de la croissance du marché dans les villes, en mobilisant la main d'œuvre et la participation populaire, et en cassant la spirale en matière de détérioration des conditions de vie;

- d'accélérer l'entrée de l'Afrique dans l'ère informatique.

Tous ces principes sont nobles mais impliquent des connaissances sur de nombreux critères ou facteurs de durabilité qui interagissent dans un environnement complexe parfois difficile à évaluer et à gérer. Une fois de plus, le défi de développer des approches pertinentes et réalistes se fait pressant. Dans le cadre de la présente recherche, nous abordons l'aspect écologique de la question, à savoir la durabilité dans l'utilisation des écosystèmes pastoraux sahéliens qui est influencée aussi bien par l'homme, le climat et le bétail. Des outils comme les SIG sont-ils appropriés pour ce faire? Le prochain point présente les principes fondamentaux de ces outils.

2.5 Les systèmes d'information géographique

Les systèmes d'information géographique (SIG) ont émergé de la recherche en matière de techniques d'acquisition, de traitement ou de modélisation des données à référence spatiale. Cette émergence qui date principalement des années 1980 répond aussi aux besoins de plus en plus accrus en matière de gestion du territoire ou de l'environnement. Ils offrent toute une gamme d'opérations applicables aux données spatiales pour la production de résultats sous forme de tableaux, cartes ou de graphiques répondant alors à plusieurs définitions. Burrough (1989) caractérise le SIG comme un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées. Cette définition sera résumée par Collet (1995) qui définit le SIG comme système informatisé d'acquisition, de gestion, d'analyse et de représentation de données à référence spatiale. Pour Didier (1990), un SIG est un ensemble de données repérées dans l'espace, structurées de manière à pouvoir en extraire des synthèses utiles à la décision. Laurini et Milleret-Raffort (1993) quant à eux, estiment qu'un SIG est un système capable de répondre aux deux objectifs suivants : définir un système d'information, aider à la décision. La meilleure définition d'un SIG pour Maguire (1991) est celle qui considère les trois perspectives suivantes :

- le point de vue identification du SIG qui lui confère son identité unique à présenter des caractéristiques spéciales relatives aux entités spatiales et leurs relations permettant

l'analyse spatiale et les opérations de modélisation;

- le point de vue technologique qui décrit le SIG comme un système opérationnel tangible ayant des capacités fonctionnelles spécifiques (capacité à manipuler l'information spatiale, les bases de données);
- le point de vue organisationnel que Chan et Williamson (1995) définissent en 5 éléments comprenant les données, l'information technologique, les normes, le personnel ayant de l'expertise en SIG et l'organisation.

Les définitions diverses proposées montrent soit le lien entre les méthodes manuelles et informatisées d'analyse cartographique (Dickinson et Calkins, 1988; Aronoff, 1989); soit l'outil pour analyser les données de la surface terrestre; ou encore, la prise en compte des organisations et des hommes impliqués dans l'utilisation des données spatiales (Carter, 1989; Maguire, 1991; Chan et Williamson, 1999).

Demers (1997) synthétise toutes ces définitions en stipulant que «de manière générale, les SIG sont des outils pour le traitement de données spatiales en information, généralement de l'information explicitement scellée pour, et utilisée pour prendre des décisions sur, une certaine portion de la Terre».

Ainsi, selon les objectifs poursuivis et les sujets d'intérêts, les SIG offrent toute une gamme d'opérations applicables aux données spatiales pour la production de résultats sous forme de tableaux, cartes ou de graphiques. Leurs forces résident dans le fait qu'ils ont permis de résoudre des questions au niveau local et de guider des responsables dans la mise en œuvre de certains programmes de développement et de gestion des ressources naturelles en procurant la compréhension spatiale et la localisation des ressources. En effet, l'organisation de l'information à l'intérieur du SIG lui confère un grand potentiel pour l'intégration et la modélisation spatiale des phénomènes naturels, notamment en matière d'écologie. Pour notre part, l'intérêt majeur du SIG réside dans sa capacité d'intégration, de considération de plus d'un problème et de combinaisons de plusieurs sources d'information pour fournir une base

d'information réaliste aussi bien pour le politicien, le décideur que l'aménagiste.

Le problème fondamental reste celui de la fiabilité des données de base (précision, niveau d'erreurs, etc.) et de leur échelle. En effet, pour qu'il soit l'outil de décision tant recherché, le SIG doit pouvoir signifier le niveau de fiabilité des résultats d'analyse, notamment en matière de ressources naturelles. Ceci est particulièrement important pour les zones à faibles ressources comme le Sahel où la survie de l'homme et de sa richesse majeure (le bétail) est tributaire de ces ressources. La question ici est de savoir jusqu'à quel point on peut assurer un niveau de fiabilité des résultats de la modélisation à l'aide du SIG et comment.

Les principes de théorie floue et de décision multicritères permettent non seulement de prendre en compte le caractère imprécis des données, mais aussi d'intégrer des critères multiples contenus dans la base de données pour présenter des choix de décisions répondant aux objectifs assignés. Les prochains points présentent ces principes et leurs application en matière de gestion de ressources naturelles.

2.6 Les fondements de la théorie floue et son application à la modélisation des phénomènes spatiaux

Les métadonnées telles que les imprécisions, les incertitudes, l'incomplétude ou la complexité des données constituent des aspects difficilement traitables par les modèles statistiques probabilistes ou par l'approche booléenne. En effet, toute incertitude n'est pas liée au hasard et la combinaison rigide de l'approche booléenne est inappropriée pour les études des phénomènes continus du fait des imprécisions dans la formulation des questions. Un des buts de la théorie floue est le développement de méthodologies pour la formulation et la résolution des problèmes trop complexes ou mal définis ne pouvant être correctement analysés par ces techniques conventionnelles (Zadeh, 1973).

La théorie floue s'appuie sur la logique floue selon laquelle l'inclusion d'un élément dans un ensemble dépend de son degré d'appartenance à cet ensemble. Ceci permet une certaine flexibilité pour définir les valeurs limites de l'ensemble. L'approche assume une appartenance

partielle, considérée comme la valeur d'une fonction d'appartenance possible sur une échelle de 0 à 1 inclus, telle que :

$$0 \leq \mu_S(\mathbf{u}) \leq 1 \quad \text{équation 2.8}$$

$\mu_S(\mathbf{u})$ = degré d'appartenance,

\mathbf{u} = propriété d'un facteur donné,

S = ensemble flou.

Plus la valeur de $\mu_S(\mathbf{u})$ est proche de 1, plus \mathbf{u} appartient à S . Le degré d'appartenance pour chacune des valeurs possibles attribué à chaque entité permet de mieux décrire les conditions de mixture ou conditions intermédiaires : les changements graduels ou les transitions dans les valeurs des paramètres du système considéré sont alors mieux exprimés et la grande variabilité spatiale des données est considérée de manière plus réaliste.

L'application de l'approche floue à la modélisation des phénomènes spatiaux et environnementaux a été réalisée dans le cadre de recherches variées allant de l'analyse de l'imprécision dans la délimitation spatiale (Altam, 1994), à la caractérisation des paysages forestiers (Roberts, 1996) et à l'étude des interactions climat-sol-animal dans les écosystèmes pastoraux (Wu et *al.*, 1996). Le principe général de l'application de l'approche floue est la définition d'indices pour les principaux paramètres considérés.

Mais le choix de la fonction d'appartenance reste le problème principal et dépend du jugement du chercheur : il est généralement subjectif. Certaines méthodes d'analyse multicritère telles que la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) peuvent contribuer à résoudre ce problème (Banai, 1993). Le point suivant donne les principes généraux de ces méthodes.

1.6 L'analyse multicritère pour la décision multicritère

Le concept fondamental des modèles de prise de décision est la rationalité dont le principe est de trouver la meilleure alternative de décisions permettant de solutionner un problème donné (Jankowski, 1995). Pour ce faire, l'approche par analyse multicritère qui consiste en une approche systémique pour concevoir et évaluer plusieurs scénarios pour lesquels la considération de critères multiples, permet de faire des choix pertinents pour la prise de décision (Chevallier et Daudelin, 1996; Pereira et *al.*, 1993). Elle procède généralement en trois phases principales : génération d'un ensemble d'alternatives, formulation d'un ensemble de critères, évaluation de l'impact de chaque alternative sur chacun des critères. Elle répond ainsi aux besoins de planification et de prise de décisions pratiques et permet l'intégration de plusieurs modèles. Le critère est formé de plusieurs paramètres indicateurs définis par un ensemble de variables. La nature de ces alternatives est variable. En effet, elle peut exprimer soit des actions, soit des hypothèses relatives à un phénomène ou encore des objets à assigner à un ensemble. D'une manière générale, les décisions influencent directement l'utilisation des ressources et aussi le comportement de ceux qui ont la charge de gérer ces ressources.

1.7 Conclusion partielle

L'application des concepts en écologie, en matière de développement ou gestion durable implique une base de données cohérentes et bien structurées permettant la modélisation et la simulation des interactions entre les différentes variables du milieu. Le chapitre suivant analyse les paramètres pertinents de la productivité et des critères de durabilité de l'écosystème pastoral sahélien en vue de la définition détaillée de la méthodologie pour la présente recherche (cadre conceptuel pour l'intégration des données). L'analyse est basée sur une revue bibliographique. Les aspects de production et de développement durable en zone aride et semi-aride de manière générale ont été analysés en nous basant plus particulièrement sur les études réalisées dans l'Oudalan. Les paramètres observables par télédétection sont extraits par les méthodes classiques de classification et d'image-interprétation.

CHAPITRE 3 LES PARAMÈTRES INDICATEURS DE DURABILITÉ DU MILIEU PASTORAL SAHÉLIEN

3.1 Introduction

La durabilité d'un système donné est une caractéristique de sa performance productive dans le temps. Plusieurs paramètres permettent de la mesurer, d'évaluer l'effet de l'utilisation ou de l'exploitation dudit système sur sa productivité et de construire des scénarios d'aide à la décision. Les méthodes spécifiques liées à la définition de ces paramètres doivent être évaluées en conformité avec leur fonctionnalité et leur applicabilité afin de fournir des informations utiles à la modélisation. En outre, le paramètre de durabilité doit fournir une information facile à répliquer et à interpréter.

Ce chapitre explore et analyse les paramètres indicateurs de durabilité pour l'exploitation de l'écosystème pastoral sahélien selon trois niveaux : 1) la durabilité dans la productivité primaire du milieu pastoral; 2) la durabilité dans la productivité secondaire; et 3) la durabilité au niveau du bien-être du producteur ou pasteur/éleveur. L'analyse s'appuie principalement sur une revue bibliographique des paramètres de productivité du milieu pastoral sahélien.

3.2 Au niveau de la productivité primaire

La productivité primaire du milieu pastoral correspond à la productivité des pâturages en biomasse et peut être exprimée par la capacité de charge (UBT.ha-1.an-1). La capacité de charge désigne le nombre d'UBT pouvant être maintenues dans une zone selon des conditions bien précises. L'UBT désigne l'unité de bétail tropical qui correspond à un zébu entier de 3 à 5 ans, pesant 250 kg de poids vif.

En milieu sahélien, le mode de production est de type extensif, ce qui signifie que l'essentiel des besoins de l'animal provient des pâturages naturels non améliorés et que les charges sont ajustées selon la disponibilité en fourrage et en eau (transhumance vers les zones plus nanties). L'évaluation de la durabilité à ce niveau est donc étroitement liée à la capacité du milieu à maintenir son niveau de production potentielle de biomasse herbacée et ligneuse. Or, une des caractéristiques fondamentales des systèmes écologiques sahéliens est leur variabilité aussi bien spatiale que temporelle. Cette variabilité est fortement influencée par plusieurs facteurs dont le climat, les conditions physiques du milieu et l'homme. Les effets de ces facteurs se traduisent et se mesurent quantitativement ou qualitativement à l'aide de paramètres variés qui concourent à la définition de la production de la biomasse primaire et peuvent être utilisés comme indicateurs de durabilité.

3.2.1 Le climat

Le climat sahélien est marqué par une aridité de plus en plus prononcée. Les paramètres indicateurs d'aridité se définissent principalement à travers une pluviosité capricieuse et irrégulière, une forte évapotranspiration ainsi que des vents violents et destructeurs du sol. Ils influencent fortement la production de biomasse herbacée et ligneuse et la disponibilité de l'eau pour les hommes et surtout pour le bétail.

3.2.1.1 La pluviosité

La pluviosité représente la quantité et la répartition spatiotemporelles des précipitations. Elle constitue l'un des facteurs climatiques les plus déterminants de la productivité de l'écosystème sahélien, mais aussi des plus variables et des plus difficiles à prendre en compte dans la modélisation. D'une part, elle conditionne la disponibilité fourragère en influençant le bilan hydrique du sol car l'installation et la croissance des plantes dépendent d'elle. D'autre part, elle conditionne aussi l'état du substrat par son influence sur la nature et la fertilité des sols. En zone sahélienne, Grouzis (1988) a montré que la végétation ne peut être considérée comme étant définitivement installée qu'après 70 mm de pluie, soit environ 20 % des précipitations annuelles de la zone. De plus, la levée est conditionnée par le taux d'humidité qui est fonction

des types de sol. Pour les milieux sableux, une dizaine de mm de pluie correspondant à une humidité pondérale de la surface du sol de 6 à 9 % suffit pour la levée, tandis que pour les sols lourds, il faut 25 à 30 mm pour provoquer la levée, soit une humidité pondérale de 10 à 15 %. En outre, l'intensité des pluies constitue un facteur de dégradation du milieu, notamment à travers l'érosion hydrique qui est très sévère dans les milieux fragiles.

L'importance de la pluviométrie se mesure aussi à travers les nombreux travaux de recherche en zone semi-aride visant à établir des relations plus ou moins directes avec la production primaire : relations linéaires entre biomasse et pluviométrie globale (Le Houérou et Hoste, 1977; Breman, 1975) ou relations entre quantité d'eau infiltrée, bilan hydrique et production primaire (Penning de Vries et Djitéye, 1982; Breman et de Ridder 1991). Les notions d'années normales, humides ou sèches sont les corollaires de ces relations. En effet, elles sont basées sur les probabilités d'occurrence des précipitations. L'année normale correspond à une probabilité de 50 % d'atteindre la valeur moyenne de la pluviométrie calculée sur une longue période. L'année sèche correspond à une probabilité de 80 % de dépasser le niveau des précipitations. L'année humide correspond à la probabilité de 20 % d'atteindre le niveau des précipitations. Mais l'établissement de relations linéaires reste hasardeux s'il ne considère pas la distribution spatiotemporelle de la pluviométrie qui influence fortement les relations. Par exemple, pour la zone d'Oursi, Grouzis (1988) a observé une variation annuelle de 22 % sur 4 années consécutives tandis que les variations spatiales atteignaient 40 % sur de faibles distances de l'ordre 5 km. D'où la nécessité de considérer des indices permettant d'exprimer la variabilité spatiotemporelle de la pluviosité dans les approches de modélisation. La notion de pluie efficace prend en compte la fréquence et la distribution spatiotemporelle. Sur le plan végétal, c'est la fraction de la pluie effectivement interceptée par la végétation et/ou stockée dans l'épaisseur du sol exploré par les racines et qui est utilisée pour alimenter l'ETP du système sol-plante (Guyot, 1997). Différentes formules sont utilisées pour déterminer les pluies efficaces. Elles sont pour la plupart linéaires : fraction constante de la pluie totale reçue, formules empiriques générales ou ajustées localement à partir d'observations et d'analyses de données climatiques. Même si elle constitue un bon indicateur de la production primaire du milieu, la mesure des pluies efficaces reste hypothétique dans la mesure où l'évaluation des pertes par ruissellement ou par percolation reste difficile à établir.

Wu et *al.*, (1996) ont défini un indice de pluviométrie effective qui intègre les variations interannuelles et saisonnières de la pluviométrie. Ces variations sont calculées selon la notion de concentration qui constitue en quelque sorte une mesure de la dispersion. L'approche est basée sur les probabilités d'occurrence de la pluie au niveau spatial et temporel. Nous y reviendrons dans le prochain chapitre.

3.2.1.2 L'évapotranspiration

Régie par des processus physiques plus ou moins complexes, l'évapotranspiration représente la quantité d'eau que le sol cède à l'atmosphère par suite de la transpiration de la couche végétale et de l'évaporation de la surface du sol. Elle dépend des facteurs climatiques comme la température et des apports énergétiques (2460 Joules pour passer de 1 kg d'eau de l'état liquide à l'état de vapeur d'après Guyot, 1997). Elle a des effets sur la disponibilité en eau pour la croissance des plantes. Plus elle sera élevée, plus l'efficacité de l'utilisation de l'eau sera affectée. Pour la zone d'Oursi, l'ETP est très élevée (une moyenne de 2852 mm enregistrée sur 7 années d'observation) avec un taux de variation de 3 %. Les maxima annuels interviennent aux mois de mai (9,5 mm.jr⁻¹) et d'octobre (8 mm.jr⁻¹) soulignant ainsi l'aridité du climat (Grouzis, 1988).

3.2.1.3 Le vent

Au Sahel, le régime du vent au sol est lié au régime de la mousson avec pour origine deux directions prédominantes :

- la direction nord-est correspond à l'harmattan qui souffle de novembre à avril;
- la direction sud-ouest apporte un flux d'air humide de la mousson de mai à octobre pendant laquelle la saison des pluies s'installe plus ou moins confortablement.

Le vent est surtout caractérisé ici par la variabilité de son intensité, notamment en début et fin de la saison hivernale où des vitesses de plus de 35 m/s pendant 15 mn peuvent être enregistrées. Ses effets sur le milieu peuvent affecter positivement ou non la productivité des pâturages : dissémination des semences ou érosion plus ou moins importante selon la structure

et la texture du sol. Pour les milieux sableux, l'érosion éolienne peut être très importante. La perte en terre fine entraîne un appauvrissement du sol et contribue à la baisse de la fertilité puisque celle-ci renferme l'essentiel des éléments nutritifs liés aux argiles et à la matière organique. De plus, la formation de dunes vives modifie le milieu. Elle constitue une des conséquences de l'action du vent qui agit indirectement sur la productivité du milieu.

L'étude de cet indicateur exige un suivi à long terme selon des dispositifs bien spécifiques tels que l'installation d'anémomètres. Ceux-ci fournissent des enregistrements continus de la direction et de la vitesse du vent pour établir des graphes à analyser. Malheureusement, dans la zone d'étude, ces types de données ne sont pas disponibles.

De ces trois éléments du climat sahélien, seul le premier, à savoir la pluviométrie, reste accessible. En effet, les données sur l'ETP et les vents ne sont disponibles pour notre zone de recherche que pour la période de recherche de l'ORSTOM (actuel IRD) et seulement pour une seule station. Or, un des objectifs de notre recherche est de pouvoir utiliser des données accessibles pour l'évaluation de la biomasse primaire. C'est pourquoi, la pluviométrie a été retenue comme l'élément climatique majeur à considérer.

3.2.2 Les conditions physiques du substrat

Les indicateurs physiques de la productivité primaire du milieu sont liés aux caractères externes et internes du substrat : géomorphologie, relief et sols. La géomorphologie et le relief définissent la répartition des affleurements des couches superficielles et déterminent la dynamique de l'eau à la surface du sol ou dans les matériaux. Ils permettent, en outre, d'interpréter la dynamique des paysages (topographie, pente) et la répartition des sols. La topographie se rapporte aux différences de hauteurs de la surface des terres. Elle dérive du gradient de pente le plus représentatif ou le plus caractéristique de la zone entourant le site. La pente influence fortement le bilan hydrique qui représente l'ensemble des facteurs dont dépend la disponibilité de l'eau dans le sol : infiltration, évaporation, transpiration, ETP. En effet, la valeur du ruissellement est directement proportionnelle à l'importance de la déclivité, au taux de dégradation de la végétation et du sol.

La diversité édaphique du milieu détermine la physionomie et la nature de la végétation car c'est elle qui définit les grands traits de la végétation, elle-même liée aux conditions climatiques. Les sols se caractérisent par un certain nombre de paramètres qui permettent de les distinguer, de les classer et de mesurer leur qualité. Il s'agit notamment de la texture et de la structure qui déterminent l'ensemble des propriétés physiques et chimiques du sol et influencent sa fertilité : teneur en éléments minéraux nécessaires à la croissance des plantes.

La texture détermine la capacité d'infiltration et de stockage de l'eau dans le sol. Elle joue un rôle déterminant pour la réserve utile. Celle-ci détermine la disponibilité en eau pour la croissance des plantes et est caractérisée par deux potentiels hydriques : la capacité au champ et le point de flétrissement. Le potentiel hydrique traduit l'effet des différentes forces de liaison (osmotique ou capillaire) existant entre les molécules d'eau et les constituants du sol ou de la plante (Guyot, 1997). La capacité au champ est la quantité d'eau qui peut être stockée par unité de volume dans le sol malgré la pesanteur. Elle traduit l'eau retenue par le sol après une période de pluie et un ressuyage de 2 ou 3 jours, le sol étant protégé contre l'érosion (Hillel, 1988). Elle indique en fait, la valeur supérieure de l'eau susceptible d'être absorbée par la plante. Le point de flétrissement quant à lui, représente la valeur limite de l'eau liée, c'est-à-dire la quantité d'eau qui peut être retenue par unité de volume du sol malgré la tension de succion des racines des plantes. C'est la quantité d'eau qui doit être stockée dans le sol avant qu'elle ne soit disponible pour les plantes. Ces définitions sont données dans la plupart des ouvrages de pédologie tels que Duchaufour (1995).

Les différences de texture traduisent les différences de capacité de stockage et peuvent être utilisées pour qualifier les sols. Par exemple, une texture sableuse traduit un sol bien aéré mais pauvre en réserves d'eau et en éléments nutritifs, tandis qu'une texture argileuse définit un sol chimiquement riche mais dont le milieu mal aéré est imperméable, formant un obstacle à la pénétration des racines. Un sol de texture légère s'humidifie profondément et la quantité d'eau disponible est importante. Ce qui peut constituer un bon indicateur de productivité primaire selon les espèces végétales en place. La texture équilibrée correspond à l'optimum. La texture du sol détermine également la rugosité et le niveau de ruissellement observable. Breman et de Ridder (1991) ont établi à cet effet des relations entre texture et ruissellement en fonction de la

pluviométrie annuelle (tableau 1). Ces coefficients varient cependant selon la pente, l'humidité antérieure et le recouvrement végétal. La rugosité détermine les irrégularités de surface et dépend de la structure du sol, de l'état de la végétation et aussi des méthodes d'exploitation culturale. Elle joue un rôle important dans les processus d'érosion, notamment l'érosion éolienne : atténuation de la force de frottement du vent sur le sol et donc diminution de sa vitesse.

La structure du sol désigne le mode d'assemblage des particules et détermine la répartition dans l'espace de la matière solide et des pores dont certains sont occupés par l'eau. Les pores les plus grossiers sont remplis d'air. La structure donne les indications essentielles sur les propriétés physiques qui assurent à la plante son alimentation en eau et sa respiration. Elle dépend de la porosité du sol qui, elle-même dépend de la densité de la fraction solide du sol. La porosité est déterminée par le volume des vides et constitue un facteur de résistance à l'érosion éolienne : plus elle est faible, moins l'action du vent ou de l'eau sur le milieu sera forte.

Tableau 1: Coefficient de ruissellement au Sahel estimé à l'aide de la texture

Pluviométrie	Sable grossier	Sable fin	Sable limoneux / limoneux-sablonneux	Limon	Argile
< 200 mm	0,05	0,15	0,45	0,45	0,40
200-400 mm	0,10	0,20	0,45	0,50	0,45
> 400 mm	0,10	0,20	0,45	0,50	0,50

Source : Breman et de Ridder (1991).

En plus de la texture et de la structure, le niveau de fertilité des sols et la teneur en éléments minéraux sont des propriétés essentielles. En effet, une des fonctions du sol consiste à fournir aux plantes les éléments nutritifs nécessaires (absorbés sous forme minérale par les racines), notamment dans les conditions naturelles sans amendements particuliers. En zone sahélienne, la fertilité dépend principalement de la teneur en matière organique (MO), en azote minéralisable et en phosphore assimilable. Ce sont des éléments déterminants de la

productivité primaire des pâturages (Penning de Vries et Djitèye, 1982). La matière organique est le principal facteur de l'agrégation qui permet, entre autres, de transformer les formes organiques de l'azote et du phosphore sous la forme inorganique absorbée par les plantes. Elle se mesure selon le rapport C/N où C représente la teneur en carbone tandis que N traduit l'azote inorganique. Ce rapport renseigne sur la richesse de l'humus en azote. En effet, plus il est élevé, plus la qualité est médiocre car il y a alors une forte résistance à la décomposition. Ainsi, on admet que :

- un rapport C/N < 10 dénote d'un sol minéralisable à faible teneur de MO;
- entre 8 et 12, la MO est bien décomposée;
- entre 15 et 25, la MO mal décomposée;
- pour C/N > 25, le sol est très pauvre en MO.

L'azote et le phosphore qui constituent les principaux éléments nutritifs des plantes, proviennent de sources différentes : atmosphère, pluie et sol. Du sol, l'absorption a lieu seulement lorsqu'ils sont sous forme inorganique : NO_3^- ou NH_4^+ pour l'azote; HPO_4^{2-} ou H_2PO_4^- pour le phosphore (forme minéralisable, soluble ou assimilable principalement dans la couche superficielle du sol entre 0 et 20 cm pour le phosphore). C'est pendant la saison de croissance des plantes que l'absorption est effective. La disponibilité de ces éléments pour la plante reste problématique bien que les quantités nécessaires soient relativement faibles : seulement environ 2 kg (0,5 à 3 kg) de phosphore et 10 à 35 kg d'azote par an et par hectare sont absorbés par la végétation naturelle (Duchaufour, 1995; Breman et de Ridder 1991). En zone sahélienne, le phosphore et l'azote constituent des facteurs limitants de la production de biomasse. D'après Penning de Vries et Djitèye (1982), pour une pluviométrie annuelle inférieure à 200 mm, l'eau constitue le facteur limitant de la croissance des plantes, tandis qu'au-delà de 300 mm, ce sont l'azote et le phosphore qui sont limitants.

Les différentes caractéristiques des sols que nous venons d'exposer déterminent leurs capacités à supporter les activités humaines telles que l'agriculture et l'élevage dans l'optique d'un développement durable. Elles forment les conditions de base du développement de la végétation et par conséquent, de la productivité pastorale.

3.2.3 La végétation

La végétation est caractérisée par son hétérogénéité. Cette dernière est liée à la nature diversifiée du sol et à la topographie qui, renforcées par l'action anthropique et le surpâturage, influencent la disponibilité et la redistribution de l'eau de pluie (infiltration, ruissellement). Plusieurs paramètres permettent de décrire les différentes strates (arborée, arbustive et herbacée) qui composent la végétation et d'évaluer l'état de l'écosystème. On distingue ainsi le taux de recouvrement, la composition floristique, l'abondance numérique et l'indice foliaire (LAI) qui concourent à la détermination de la biomasse herbacée et ligneuse.

3.2.3.1 Le taux de recouvrement

Le taux de recouvrement peut être défini au niveau aérien ou au niveau basal. Le recouvrement aérien exprime le rapport entre la surface recouverte par les individus d'une espèce donnée (projection horizontale de leur couronne végétative vivante) et la surface totale du relevé ou de l'élément analysé. Il est généralement relié à la strate ligneuse et permet d'estimer l'aptitude du milieu à fournir au bétail l'ombrage de repos nécessaire au maintien de son état physiologique. Le recouvrement basal correspond au recouvrement du sol à la base et est mieux indiqué pour l'évaluation de la strate herbacée. Il permet alors d'établir le niveau de sol nu et d'évaluer par conséquent les risques d'érosion et de dégradation du milieu. Il constitue un des facteurs les plus importants pour la protection des sols contre l'érosion (il est intégré dans les équations des pertes de sols sous la forme d'un facteur). Le recouvrement basal et le recouvrement aérien définissent le degré d'ouverture des strates. Ce dernier détermine le type de formation végétale qui est l'ensemble des végétaux présentant des caractères convergents dans leurs formes et parfois même dans leurs comportements. La formation peut ainsi être simple (une forme biologique unique) ou complexe (deux ou plusieurs formes biologiques principales).

3.2.3.2 La composition floristique et l'abondance numérique

La composition floristique et l'abondance numérique sont aussi des indicateurs pertinents de

l'état de dégradation du milieu. L'abondance numérique est un caractère phyto-sociologique qui exprime le nombre d'individus présents sur la surface d'un relevé telle que délimitée sur le terrain. Il permet d'établir la variabilité interannuelle de la composition floristique et d'en déduire les changements intervenus dans le milieu. Par exemple, la disparition de certaines espèces pérennes indique une baisse de productivité en fourrage ou encore un surpâturage.

3.2.3.3 La biomasse herbacée et ligneuse

Base essentielle de l'alimentation du bétail au Sahel, la biomasse végétale constitue une denrée inestimable. Elle est le fruit d'une combinaison et d'une interférence des différents paramètres décrits plus haut. Elle provient des strates herbacée et ligneuse. Chacune de ces strates occupe une place de choix mais elles restent complémentaires. Aussi, la biomasse végétale constitue-t-elle un paramètre clé de durabilité du milieu. Cependant, son évaluation doit prendre en compte d'autres éléments permettant de définir des capacités de charge acceptable. Ainsi, des pertes de biomasse herbacée surviennent par piétinement, pourrissement ou voracité des termites, insectes et autres petits herbivores. La fraction consommable est donc réduite. Les feux de brousse constituent un autre facteur de pertes de biomasse mais il ne s'applique pas à notre cas présent car les feux sont quasi inexistants. Un taux de perte de 35 % est généralement retenu, compte tenu des conditions particulières de disponibilité du fourrage dans la zone d'étude. Un autre paramètre de disponibilité de la biomasse pour les animaux est celui de la sélection. En effet, elle peut influencer le niveau d'appétibilité et de digestibilité. Mais la faible productivité en fourrage dans les conditions sahéliennes la rend négligeable.

Les herbacées ne peuvent pas assurer la maintenance sans apport de protéine brute (PB) et de calorie. Un apport minimal journalier de 0,1 de PB et de 0,07 MJ par kilogramme de poids vif (PV) est nécessaire. D'après Le Houérou (1980), il faut un apport d'au moins 20 % de fourrage ligneux en saison sèche pour assurer le niveau de maintenance en zone sahélienne dans des conditions d'alimentation basées uniquement sur les ressources naturelles. La biomasse ligneuse constitue donc une composante importante de la productivité des milieux sahéliens. En effet, en saison sèche, elle apporte les compléments énergétiques et les protéines nécessaires à l'entretien ou à la production des animaux. En termes d'énergie, les ligneux fourragers contiennent le double de celle des herbacées sèches (extrêmement déficientes en

protéine, phosphore et carotène). Cependant, l'évaluation de la biomasse ligneuse reste encore peu maîtrisée. Elle doit prendre en compte les feuilles et aussi les branchettes et les fruits qui fournissent des apports importants pour l'alimentation du bétail. En ce qui concerne les feuilles, des relations allométriques liant certains paramètres physiques des ligneux à la production de biomasse ont été établies pour chaque espèce et peuvent servir de référence (tableau 2). Les paramètres utilisés sont la circonférence du tronc mesurée à 40 cm du sol, le diamètre à la base, la hauteur ou la surface du houppier (Nébou et Toutain, 1978; Cissé, 1980). La production des feuilles peut être également estimée à partir du taux de recouvrement aérien sur la base du nombre moyen de couches de feuillages (indice foliaire) et du poids spécifique de la feuille (équation 3.1). L'indice foliaire ou LAI exprime la surface d'un côté de la feuille verte par unité de sol. Son importance est due au fait que la photosynthèse a lieu dans les organes verts de la plante.

$$PF = LAI * PsF * Co \quad \text{équation 3.1}$$

Co = taux de couverture aérien,

PF = production foliaire,

PsF = poids spécifique de la feuille,

LAI = Leaf Area Index.

Mais la durabilité de l'exploitation du fourrage ligneux impose des conditions limites à respecter. Breman et de Ridder (1991) estiment que 25 à 60 % d'utilisation des feuilles implique une baisse de la production annuelle de 10 à 30 % sauf en cas de compensation en éléments nutritifs, notamment en phosphore. Pour une durabilité non compromise, un taux d'exploitation de 15 % constitue un optimum.

3.2.4 Les résidus de récolte

Les résidus de récolte fournissent un apport non négligeable en matière de biomasse disponible pour le bétail (tiges de mil, fanes de niébé). Leur évaluation quantitative se fait selon des ratios entre la production de grain et la production de paille ou résidus (tableau 3). Cependant, ces méthodes permettent d'estimer la production brute, le disponible pour les

animaux doit alors tenir compte des autres formes d'utilisation et de pertes (énergie de chauffe, perte liée à la lignification trop importante). Un taux d'utilisation de 75 % est généralement retenu pour le Sahel pour évaluer le disponible.

Tableau 2 : Relations allométriques entre biomasse foliaire et paramètres physiques

Espèce	$P_f / \text{diamètre}$	P_f / C_{tronc}	$P_f / \text{Hauteur}$	$P_f / \text{Surface de la couronne}$
<i>Acacia albida</i>		$C_{\text{tronc}}^{2,08}$	$(98/10^6) * H_{\text{ind}}^{2,77}$	$0,32 * S_c^{1,26}$
<i>Acacia seyal</i>		$0,68 C_{\text{tronc}}^{2,25}$	$(20/10^6) * H_{\text{ind}}^{3,06}$	$0,21 * S_c^{1,22}$
<i>Pterocarpus lucens</i>		$93 C_{\text{tronc}}^{2,05}$	$(65/10^6) * H_{\text{ind}}^{2,83}$	$0,60 * S_c^{1,22}$
<i>Ziziphus mauritiana</i>		$1,38 C_{\text{tronc}}^{1,91}$	$(3/10^6) * H_{\text{ind}}^{2,83}$	$0,60 * S_c^{1,22}$
<i>Commifora africana</i>		$1,51 C_{\text{tronc}}^{1,78}$	$(155/10^6) * H_{\text{ind}}^{3,21}$	
<i>Balanites aegyptiaca</i>		$6,46 C_{\text{tronc}}^{1,50}$	$(38/10^6) * H_{\text{ind}}^{2,97}$	
<i>Balanites aegyptiaca</i>	$(540 * D_b) - 521$			
<i>Combretum aculeatum</i>	$(60,6 * D_b) - 17,7$			
<i>Acacia raddiana</i>	$(52,5 * D_b) - 44,6$			
<i>Acacia laeta</i>	$(142 * D_b) + 216,7$			

Source : Nébou et Toutain, 1978, Cissé, 1980.

P_F = biomasse foliaire,

D_b = diamètre à la base,

C_{tronc} = circonférence du tronc,

H_{ind} = hauteur de l'individu,

S_c = surface de la couronne.

Tableau 3 : Rapport grain/paille des principales espèces cultivées dans la zone

Production	Mil	Sorgho	Riz	Maïs	Arachide	Niébé
Ratio grain/paille	0,125	0,25	0,5	0,33	0,17	0,25

Source : Breman et Traoré (1987).

3.3 Durabilité au niveau de la productivité secondaire

D'un point de vue pastoral, la productivité secondaire exprime la capacité du milieu à faire produire l'UBT sur une surface donnée, en une période donnée. Elle se réfère à la limite supérieure atteinte par la courbe d'une croissance théorique d'une population animale donnée dans un espace limité, avec des ressources limitées et sous des conditions physiques données. En d'autres termes, elle se rapporte à l'animal et traduit son rendement en lait, viande ou travail. Il s'agit du gain de poids net en kg de viande ou de lait par unité de surface et par unité de temps. Par conséquent, la durabilité à ce niveau dépend de plusieurs paramètres (qualité de la production primaire et état de santé de l'animal) qui interfèrent avec les caractéristiques intrinsèques de l'animal, la conduite des troupeaux et la situation socioéconomique du milieu. Cette imbrication détermine la réponse de l'animal aux conditions d'alimentation (qualité et quantité). La productivité secondaire est de ce fait étroitement liée au statut écologique du milieu.

3.3.1 La qualité du fourrage

La qualité du fourrage pour l'élevage est un concept très complexe : elle dépend non seulement des éléments nutritifs mais aussi de la quantité consommée par l'animal (Boudet, 1978). Elle est définie par sa valeur énergétique, sa valeur azotée, son appétibilité et, pour les ligneux, le taux de tanin.

La valeur énergétique est exprimée en UF. L'UF désigne l'unité fourragère équivalent d'un kilogramme d'orge en grain produisant 1883 calories pour les ruminants. Elle dépend de la digestibilité de la matière organique déterminée par le taux de cellulose brute. Lorsque ce dernier augmente, la digestibilité et la valeur énergétique diminuent. Par ailleurs, la digestibilité de la matière organique est proportionnelle au taux d'azote. Les graminées annuelles, en majorité des plantes en C4, présentent généralement un rapport positif entre ces deux paramètres (23 g d'azote par kg implique une digestibilité de 73 %). Pour ces espèces, la baisse du taux d'azote est proportionnelle à la diminution de la digestibilité due à la

lignification, tandis que pour les légumineuses, le niveau d'azote baisse moins vite que le vieillissement.

Rappelons que l'on distingue deux types de plantes selon les mécanismes utilisés pour la photosynthèse (production de glucose à partir de l'énergie solaire) : les plantes en C3 et celles en C4 caractérisées par des différences physiologiques, morphologiques et biochimiques. Par exemple, sur le plan physiologique, les plantes en C4 ont un usage plus efficace de l'énergie solaire se traduisant par une photosynthèse plus élevée par rapport aux plantes en C3. De plus, pour les premières, la température ne constitue pas un facteur limitant pour leur activité photosynthétique. Au Sahel, les plantes en C4 sont actives à 40°C et même au-delà (Penning de Vries et Djitéye, 1982).

La valeur azotée du fourrage est traduite par la teneur en matière azotée digestible et est proportionnelle à la teneur en matière azotée brute (Rivière , 1978) :

$$\text{MAB} = \text{N} * 6,25 \quad \text{équation 3.2}$$

$$\text{MAD} = 9,29 * \text{MAB} - 35,2 \quad \text{équation 3.3}$$

MAD = matière azotée digestible en gramme,

MAB = matière azotée brute en gramme,

N = azote en %.

Les teneurs en azote et phosphore et les immobilisations minérales varient de manière saisonnière. Elles sont en relation avec le stade phénologique (appauvrissement avec l'âge), les conditions édaphiques (fertilité du sol) et aussi la nature des espèces dominantes : les UP à dominance légumineuses offrent une meilleure qualité de fourrage comparativement à celles à dominance graminées annuelles. Le tableau 4 donne une estimation de la qualité de fourrage selon le taux d'énergie et de protéine digestible (d'après Boudet et Rivière, 1968).

Tableau 4 : Classification de la qualité des fourrages

Qualité	Énergie nette (MJ.kg ⁻¹)	Protéine digestible (% MS)	Rapport nutritionnel (g PD.UF ⁻¹ .kg ⁻¹)
Pauvre	< 3,10	< 2,5	< 55
Passable	3,10 - 3,45	2,5 - 3,4	55 - 68
Bonne	3,45 - 4,15	3,4 - 5,3	68 - 88
Excellente	> 4,15	> 5,3	> 88

MJ = Milli Joule

MS = Matière Sèche

UF = Unité Fourragère

PD = Protéine Digestible

kg = kilogramme

g = gramme

3.3.2 Les caractéristiques intrinsèques de l'UBT

La productivité secondaire est liée à la qualité de la production primaire et dépend aussi des besoins alimentaires de l'animal. Ceux-ci sont en relation avec la race et l'âge de l'animal qui déterminent les besoins d'entretien et de production. Par exemple, pour le zébu castré de 3 à 5 ans, une production journalière de 500 g de viande nécessite en moyenne un apport énergétique de 5 UF et environ 280 g de MAD.

D'une manière générale, pour son entretien, l'UBT a besoin de 0,9 UF pour 100 kg de PV en plus des besoins énergétiques pour les déplacements (environ 0,6UF) et d'environ 150g de MAD (Rivière, 1978). Ces besoins augmentent en saison sèche : 1,3 UF par jour contre 0,45 UF en saison des pluies.

Pour la production de lait, en plus des besoins d'entretien et de croissance, il faut ajouter 0,4 UF par kg de lait à 4 % de matières grasses et 60 g de MAD en plus des éléments minéraux tels que le sel, le calcium et le phosphore. Le tableau 5 donne les besoins de production de lait ou de viande. De même, pour le travail, l'énergie en besoins d'entretien est multipliée par 1,5 à 2,5 selon le niveau de travail que l'animal fournit, et les besoins en MAD sont de l'ordre de 0,7 à 0,8 g par kg de PV.

Mentionnons que dans les conditions d'élevage traditionnel sahélien, on définit les différentes espèces de la manière suivante (Breman et de Ridder 1991):

1 bovin = 0,7 UBT 1 ovin = 0,10 UBT 1 caprin = 0,08 UBT
 1 camelin = 1,25 UBT 1 équin = 1 UBT 1 asin = 0,5 UBT

Tableau 5 : Évaluation des besoins en UF et MAD

Besoins	UF	MAD (g.UF ⁻¹)	Calcium (g)	Phosphore (g)	Sel (g)
Entretien + déplacement (10 km.jr ⁻¹)	3,4	180	15	9	15
Production de 1 litre de lait	0,4	80	3	1,6	2
Production de 3 litres de lait	1,2	240	9	4,8	6
Besoin d'une vache reproductrice	4,6	420	24	13,8	21
Production de viande (GMQ de 500g)	1,75	110			
Besoin embouche	5,15	290	15	9	15

Source : adapté de Rivière (1978).

3.3.3 *Gestion et conduite des troupeaux*

Sur le plan de la gestion et de la conduite des troupeaux, les indicateurs de productivité secondaire sont mesurés à travers la fécondité, la mortalité et la structure des troupeaux exprimée par le SR (sex ratio). En effet, ceux-ci permettent d'évaluer la productivité globale selon le disponible annuel global, le taux d'exploitation annuelle du troupeau, la productivité pondérale ou numérique, le rendement en lait et le croît capitalisé (équation 3.4).

$$PG = PN * DAG * CrCap * Ppond \quad \text{équation 3.4}$$

PG = productivité globale,

DAG = disponible annuel global en pourcentage,

CrCap = croît capitalisé en pourcentage,

PN = productivité numérique, exprime le taux d'exploitation du troupeau,
 Ppond = productivité pondérale.

$$PPond = \frac{\text{carcasse annuellement exploitée}}{\text{poids total du troupeau}} = \text{rendement brut} \quad \text{équation 3.5}$$

$$PN = \frac{NAE}{DAG} \quad \text{équation 3.6}$$

$$CrCap = \frac{DAG * m * F}{DAG} \quad \text{équation 3.7}$$

F = taux de fécondité (nombre absolu de naissances au cours d'une année rapporté à l'effectif moyen des femelles reproductrices);
 NAE = nombre d'animaux exploités;
 m = taux de mortalité.

La productivité pondérale indique le tonnage de viande produit par rapport au nombre composant le troupeau et s'exprime donc en kg vif ou kg carcasse. Le croît capitalisé traduit l'augmentation globale du troupeau en une année, tandis que la productivité numérique désigne la proportion des animaux exploités par rapport au cheptel moyen de la période considérée (Tyc, 1992). Pour la zone d'Oursi, un taux de mortalité annuel de 5 % est généralement admis par les services des statistiques animales avec un taux de reproduction de 50 %. Le SR est de 28 % de mâles et 41,5 % de femelles reproductives.

L'état des infrastructures constitue également un facteur de stimulation de la population pour un développement durable : pistes reliant les différents points d'échange comme les marchés, pistes à bétail, infrastructures hydrauliques, postes vétérinaires où les animaux peuvent bénéficier de soins spécialisés, parcs de vaccination et magasins de stockage de sous-produits agro-industriels (SPAI) ou de céréales. Par ailleurs, la présence du personnel d'encadrement technique constitue un atout pour le développement pastoral.

3.3.4 La disponibilité de l'eau

Au Sahel, l'eau est un facteur déterminant pour le pastoralisme. Son importance devient encore plus évidente en saison sèche lorsque l'exploitation fourragère est déterminée par sa présence. Les normes d'aménagement et de gestion en la matière préconisent l'implantation des points d'eau sur un rayon maximum de 12,5 km qui devraient assurer les besoins journaliers du bétail tels que décrit au tableau 6. Mais, compte tenu de sa rareté, l'eau constitue aussi un facteur de dégradation du milieu, ce qui entrave sa durabilité. En effet, des études ont montré que les attroupements importants du bétail autour des points d'eau sont sources de compactage du sol et de dégradation de la végétation. Dans ces conditions, la norme de 12,5 km de rayon peut poser des problèmes si la densité animale est importante.

Tableau 6 : Besoins journaliers en eau par espèce animale

Espèce animale	Litres
Bovin	30
Ovin	5
Caprin	5
Équin	40
Asin	30
Camelin	40

Source : DIRH, Ministère de l'Eau, Projet Bilan d'eau, 1991.

3.4 Durabilité au niveau du producteur

Au niveau du producteur, la durabilité des actions de développement est évaluée à travers sa position de bien-être social et économique. Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre 2, plusieurs éléments entrent dans cette définition de la durabilité. Pour notre part, nous retiendrons l'état de santé, le niveau d'éducation du producteur et la disponibilité de certaines infrastructures qui déterminent le plus son comportement dans la gestion du milieu et celle de son troupeau.

3.4.1 L'accès aux soins de santé

La situation nutritionnelle et l'accès aux soins constituent des indicateurs qui permettent d'évaluer l'état de santé. La situation nutritionnelle traduit la situation alimentaire (disponibilité ou redistribution des vivres) et détermine la vulnérabilité à la maladie. L'évaluation de la situation alimentaire doit non seulement tenir compte des paramètres absolus (production minimum, maximum ou moyenne) mais surtout de la variation annuelle de la disponibilité en vivres (Kessler, 1994) selon les années (normale, excédentaire ou déficitaire). Par exemple, le déficit céréalier constitue une caractéristique fondamentale du milieu sahélien. Cependant, son importance fluctue dans le temps et dans l'espace : déficit important en céréales en saison pluvieuse et faible production de lait en saison sèche. Ceci commande alors des systèmes de compensation saisonnière dynamiques. Le niveau de production animale doit alors compenser ces risques en assurant notamment les approvisionnements en céréales. Sur le plan économique, ceci fait appel au 'nerf de la guerre' que constitue le prix aux producteurs. En effet, les marchés local, national et même extérieur influencent fortement les systèmes de production et de gestion en relation avec les infrastructures disponibles (routes, marchés, centres d'approvisionnement en aliments pour bétail, postes vétérinaires) dont l'accès et les distances affectent la productivité.

L'accès aux soins est un critère qui traduit la disponibilité en personnel de santé et en infrastructures sanitaires (localisation géographique et types). Les normes établies par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) et indiquées dans le tableau 7 visent à assurer un niveau de santé acceptable pour les populations. Pour le Burkina Faso, un centre de santé et de promotion sociale (CSPS) pour 12 000 habitants est préconisé avec un rayon d'action de 10,50 km (DEP-Santé, 1996). On estime que le rayon d'action constitue un atout pour la fréquentation des centres de santé.

3.4.2 L'accès à l'éducation et à la terre

L'éducation est un paramètre de développement et de gestion durable des ressources car elle influence les modes de vie et le savoir-faire de l'individu. Pour le Burkina Faso, les critères

permettant de l'estimer sont :

- le rayon d'action : 3 km par école d'enseignement du premier degré;
- le nombre d'écoles par village : 1 école pour 3 villages et pour environ 3350 habitants;
- le nombre de collèges d'enseignement général par département : 1;
- le nombre de centres d'alphabétisation par province : 1;
- le nombre de centres de formation de jeunes agriculteurs par département : 1.

L'accès à la terre (problème foncier) constitue un facteur de production et de gestion durable. Il est particulièrement perceptible en saison pluvieuse, lorsque la mise en culture des bas-fonds entrave l'accès aux pâturages et aux points d'abreuvement.

Tableau 7 : Normes OMS en personnel de santé (unité pour x habitants)

Domaine	Médecin	Chirurgien dentaire	Sage- femme	Infirmier d'état	Infirmier breveté	Auxiliaire de santé
Rapport	1 / 10 000	1 / 20 000	1/5 000	1 / 5000	1 / 3000	1 / 1000

Source : Direction des Études et de la Planification, Ministère de la Santé, 1996.

3.5 Conclusion partielle

Les paramètres de production primaire ou secondaire du milieu sont nombreux. Leur considération dans un cadre global d'intégration des données dans le SIG impose une analyse minutieuse sur leur disponibilité, leur fiabilité et leur importance dans la modélisation. Le modèle n'est-il pas une abstraction du réel! Il faut donc une simplification qui soit à la fois réaliste et permette de prendre en compte tous les paramètres pertinents pour la simulation. La partie II de la thèse examine ces éléments.

4.1 Introduction

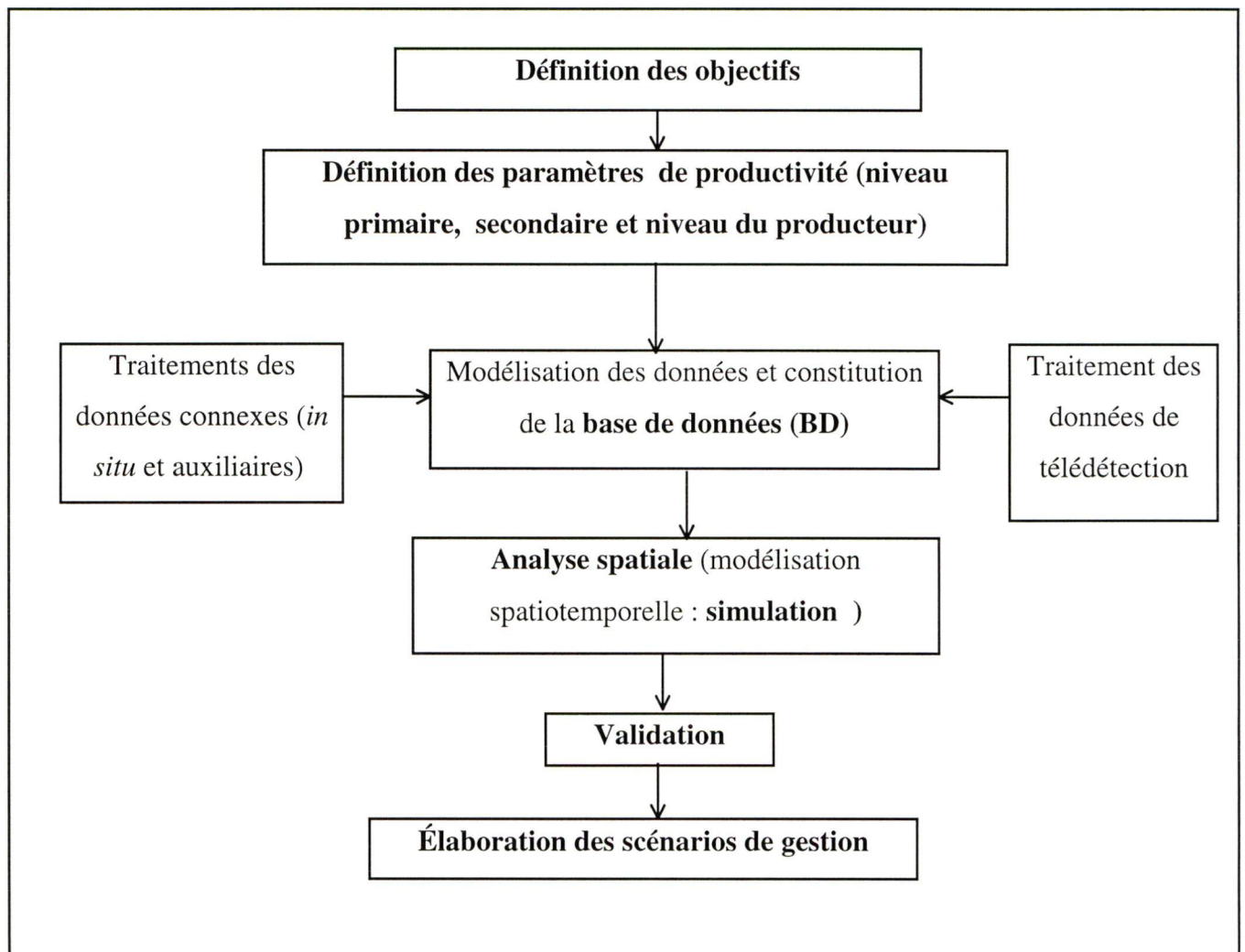
L'écosystème pastoral, comme nous l'avons abordé aux chapitres 2 et 3, est un système où interagissent de manière complexe le milieu, l'animal, le végétal et l'homme selon les objectifs de production définis par ce dernier. Face à cette complexité, la démarche adoptée dans la présente recherche se subdivise en quatre étapes. Rappelons que la recherche vise à modéliser les interactions des paramètres majeurs pour la prédiction des productions primaire et secondaire à partir desquelles des propositions de scénario de gestion peuvent être conçues dans un cadre de développement durable. Le concept général de l'approche globale de la recherche est donné par la figure 3.

Tout d'abord, une analyse des paramètres physiques, biologiques et socioéconomiques affectant la productivité des écosystèmes pastoraux sahéliens a été réalisée à partir de la littérature. Elle a permis de définir les principaux paramètres indicateurs de productivité des pâturages sahéliens et les critères de gestion durable du milieu sahélien (chapitre 3) pour la constitution de la base de données nécessaire à la présente recherche.

Ensuite, à partir de cette analyse, un cadre conceptuel détaillé pour la simulation de la production primaire et secondaire du milieu a été élaboré suivant un modèle qui décrit les interactions climat-plante-sol-animal, en occurrence le modèle de Wu et al, (1996). Il s'agit de l'étape 2. Les aspects socioéconomiques du milieu ont été ensuite intégrés à ce modèle afin de tester l'hypothèse relative à l'amélioration des résultats de prédiction de la biomasse. La mise en œuvre de cette approche a été réalisée de manière dynamique pour représenter l'évolution spatiale et temporelle des paramètres de productivité du milieu en vue de prédire la production primaire et secondaire de la biomasse. La simulation est ensuite réalisée sur 10 années consécutives de 1986 à 1996. Les données initiales (1986) proviennent d'études antérieures, notamment celles de Toutain et de Wispelelaere (1978), de Badiara (1986) et de Grouzis

(1988). Les données de 1996 quant à elles, ont été acquises in situ lors d'une campagne de terrain à la même année. Étant donné la nature floue des données en zone sahélienne souvent extraites de la littérature et de l'expérience des experts (non disponibilité et incomplétude), la spatialisation de certains paramètres a été réalisée par approche floue ou par hiérarchisation multicritère. Les données satellitales ont aussi servi de base pour l'initialisation de certains paramètres. Cette étape constitue l'étape charnière de notre recherche car elle correspond à l'élaboration proprement dite de l'architecture d'intégration des données. Il faut aussi noter que des tests de sensibilité ont été également réalisés afin de définir les valeurs limites de certaines variables du modèle.

Figure 3 : Schéma général de la méthodologie de recherche



Dans la troisième étape, la validation des résultats de la modélisation a été réalisée par

comparaison des extrants des deux modèles (Wu standard et Wu modifié) avec les résultats de la campagne in situ de 1996. Le modèle de Wu modifié intègre les indicateurs socioéconomiques considérés. Cette étape a permis d'évaluer la pertinence de l'approche.

Enfin, la dernière étape a consisté en l'élaboration des scénarios de gestion sur la base des résultats validés sur l'état du milieu, notamment sa production primaire et sa qualité. Elle a abouti à la proposition de méthodes d'exploitation et d'aménagement dans l'espace et dans le temps.

Le logiciel ILWIS (Integrated Land and Water Information System) a servi de cadre de recherche pour la modélisation et le logiciel Easy Pace de PCI pour les traitements des images satellitales. La revue bibliographique ayant été déjà décrite au chapitre 3, le présent chapitre décrit la méthodologie détaillée utilisée dans les autres étapes.

4.2 Le cadre conceptuel d'intégration des données

Afin de prendre en compte tous les paramètres pertinents (climatiques, physiques et socioéconomiques) analysés et définis dans le dernier chapitre, l'approche qui consiste à simplifier les différentes interactions à l'aide de modèles déterministes ou théoriques et de modèles analytiques a été privilégiée. Le concept vise la compréhension du système complexe climat-sol-plante-animal-homme en zone sahélienne semi-aride et sa modélisation. Le modèle de Wu et *al.* (1996) est, dans un premier temps, appliqué au cas sahélien puis, les facteurs socioéconomiques propres au Sahel y sont intégrés pour répondre à notre objectif fondamental qui est l'intégration de tous les facteurs de productivité du milieu pastoral.

4.2.1 *Le modèle de Wu et al. (1996) pour la prévision de la biomasse : intrants et approches*

Le modèle s'appuie sur les théories et principes écologiques qui ont été exposés au chapitre 2. Ces théories et principes sont combinés dans une approche dynamique pour évaluer la production du milieu pastoral. Développé dans un environnement semi-aride, le modèle de Wu et al. (1996) considère le climat comme principal fil conducteur de cette production. En effet, c'est autour de lui que les différents paramètres de productivité du milieu se définissent. La figure 4 schématise le modèle. Cette simplification du système fait de ce modèle une approche applicable dans des conditions de non disponibilités de données quantitatives détaillées et abondantes.

Le modèle s'inspire du système «laisser-faire» (réf. figure 2) basé sur la théorie de la dynamique des systèmes interactifs en écologie selon l'approche proie-prédateur. Le taux de renouvellement des ressources est influencé entre autres par la charge animale en rapport avec le taux de croissance et la disponibilité de la végétation (réf. chapitre 2). La biomasse est évaluée par simulation à l'aide de trois paramètres principaux : la productivité potentielle de biomasse, l'indice caractéristique du milieu et son indice d'humidité (équation 4.1). Chacun de ces paramètres est à son tour modélisé en considérant les aspects spatiotemporels de l'évolution de ses différentes composantes.

$$V(t) = V_{\max} * K(t) * R_c(t) \quad \text{équation 4.1}$$

V_{\max} = productivité maximale de biomasse,

K = indice caractéristique du milieu ,

R_c = indice d'humidité

t = temps

4.2.1.1 *L'indice caractéristique du milieu*

Une des forces de ce modèle réside dans l'évaluation de cet indice. En effet, l'indice caractéristique du milieu constitue la réponse du milieu aux différents facteurs qui

interagissent et déterminent la productivité primaire de celui-ci. Le modèle de Wu combine à cet effet quatre paramètres : la pluviométrie, la couverture basale, la pente et la pression animale. Ces paramètres sont évalués à travers une approche itérative et interférentielle (équations 4.2 & 4.3) permettant de décrire et de quantifier leurs impacts positifs et négatifs. Les impacts positifs (équation 4.4) proviennent des effets combinés de la pluviométrie et du couvert basal sur le milieu. La pente et la pression de charge animale sont les éléments déterminants des impacts négatifs (équation 4.5).

$$K(t+1) = K(t) * (1+\Delta K(t)) \quad \text{équation 4.2}$$

$K(t+1)$ = statut écologique du milieu en un temps donné t+1,
 $K(t)$ = statut écologique du milieu en un temps de référence donné t,
 $\Delta K(t)$ = indice de dégradation du sol.

$$\Delta K(t) = \frac{b * (I_+(t) - I_-(t))}{1 + I_+(t) + I_-(t)} \quad \text{équation 4.3}$$

b = facteur d'échelle,
 $I_-(t)$ = impacts négatifs des différents paramètres de productivité primaire,
 $I_+(t)$ = effets positifs des différents paramètres de productivité primaire.

$$I_+(t) = R(t)*C(t) \quad \text{équation 4.4}$$

$$I_-(t) = [1 - C(t)] * \{ S + s * (\max(0, O_G(t))) \} \quad \text{équation 4.5}$$

$C(t)$ = indice de couverture basale de la végétation,
 $R(t)$ = indice de pluviométrie effective,
S = pente,
s = paramètre convertissant l'indice de surpâturage en pente équivalente,
 $O_G(t)$ = indice de surpâturage.

Le facteur d'échelle (b) est défini en calculant la variation de K en fonction de R(t) pour C(t) constant, tandis que s est défini de manière subjective en considérant qu'en zone de faible pente, l'impact du surpâturage et de la surexploitation agricole sur le milieu est plus important que celui de la pente elle-même (1,5 fois supérieur).

La carte de pente est établie à partir de la carte topographique au 1/50 000 du BUNASOLS, 1989 par interpolation linéaire des courbes de niveau selon la procédure standard de ILWIS : conversion des segments (valeurs d'altitude) en raster, puis, interpolation selon la méthode de la distance de Borgfors pour obtenir les altitudes des valeurs indéfinies entre les courbes de niveau rasterisées (ILWIS User's Guide, p.377).

4.2.1.2 La couverture basale

Sa modélisation est réalisée en considérant les différentes phases de développement de la plante en relation avec les effets de la sécheresse (équation 4.6). L'indice ainsi calculé, traduit la réponse du milieu à la pression animale et à la pluviométrie. Ces deux paramètres sont combinés pour déterminer la durée et l'intensité des périodes sèches pouvant affecter la production de biomasse végétale. Les auteurs assument que pour une précipitation donnée, le couvert végétal peut influencer fortement les effets négatifs de la pluviométrie, c'est-à-dire qu'un sol couvert favorise l'infiltration et la rétention de l'eau, tandis que le sol nu augmente les impacts négatifs de la pluie renforcés par la pente et le surpâturage. De plus, la végétation qui subit un stress hydrique à un stade critique de son développement aura une productivité proportionnelle à ce stress subi. En d'autres termes, la pression animale et le niveau de sécheresse affectent la couverture basale.

$$C(t) = \sum_i \frac{c_i}{1 + e^{\left(\alpha_{c_i}(X(t) - X_{1/2}^i)\right)}} \quad \text{équation 4.6}$$

X(t) = pression cumulée de pâture due à la sécheresse qui mesure la durée et l'intensité des périodes sèches (t) sous pression animale,

c_i = indice de couverture végétale à une phase de développement donnée,

α_{ci} = taux de variation de $C(t)$ durant la phase i .

$$X(t+1) = \max[0, X(t) + \Delta X] \quad \text{équation 4.7}$$

La variation de la pression de pâture (ΔX) est décrite en fonction de l'état de sécheresse et de la charge animale actuelle telle que :

$$\Delta X = \begin{cases} DS(t) * \sigma * \max[0, O_G(t)] & \text{pour } DS(t) > 0 \\ DS(t) * \max[0, 1 - \sigma * \max(0, O_G(t))] & \text{pour } DS(t) < 0 \end{cases} \quad \text{équation 4.8}$$

σ = paramètre exprimant l'impact du bétail sur l'indicateur de surpâturage $O_G(t)$,

$O_G(t)$ = indice de surpâturage,

$DS(t)$ = état de sécheresse.

$$O_G(t) = \frac{GP(t)}{GP_{ref}} - 1 \quad \text{équation 4.9}$$

$$DS(t) = R_{ref} * \max\left[1, \frac{GP(t)}{GP_{ref}}\right] - R(t) \quad \text{équation 4.10}$$

$$GP(t) = \frac{H(t)}{V(t)} \quad \text{équation 4.11}$$

R_{ref} = pluviométrie effective de référence,

$GP(t)$ = pression animale à l'instant t due à la pâture (charge actuelle),

GP_{ref} = pression animale de référence.

4.2.1.3 La pluviométrie

Les auteurs ont modélisé ce paramètre par l'indice de pluviométrie effective qui mesure la quantité et la qualité des pluies reçues au cours de la saison. Ce qui permet d'intégrer les effets des distributions temporelles interannuelle et saisonnière (indice de précipitation et indice de distribution) calculées à partir des données décadaires de la précipitation. Cet indice décrit en fait la dispersion relative de la pluviométrie à l'aide de mesures de la concentration spatiotemporelle de celle-ci. Une description détaillée des méthodes de calcul de R_p et R_d est

donnée par Wu et al. (1996).

$$R(t) = R_p(t) * R_d(t)$$

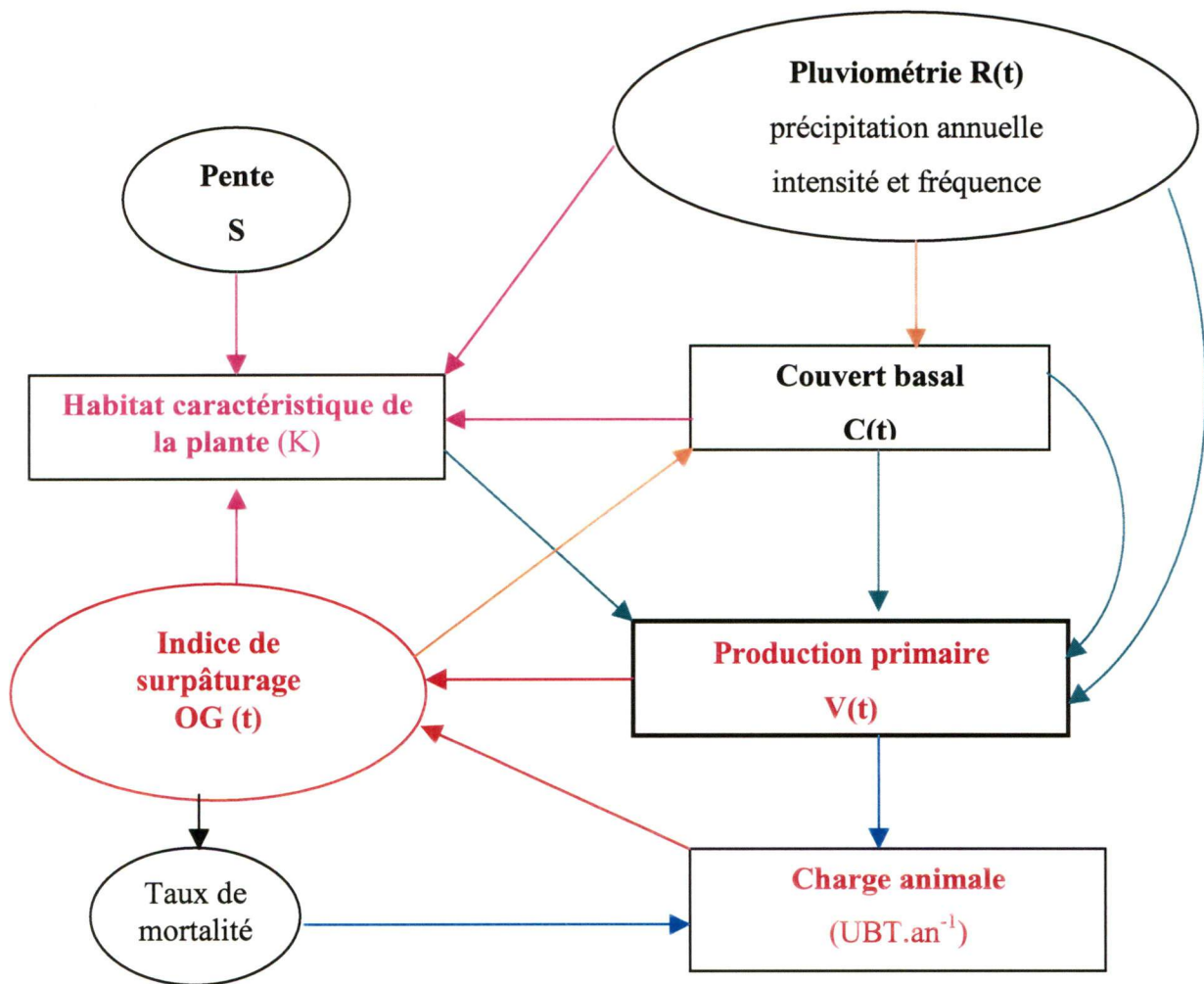
équation 4.12

$R(t)$ = indice de pluviométrie effective,

$R_p(t)$ = indice de précipitation exprimant la variation interannuelle,

$R_d(t)$ = indice de distribution exprimant la variation saisonnière.

Figure 4 : Concept de modélisation des interactions climat-sol-végétation-animal selon Wu et al. (1996)



4.2.1.4 La charge animale

La variation temporelle de la charge animale du milieu est modélisée par la combinaison des lois de croissance et de mortalité (bilan fécondité / mortalité). Ce qui permet d'évaluer entre autres les niveaux de surexploitation pastorale et la pression animale exercée sur le milieu. Pour ce faire, la capacité de charge potentielle est calculée selon les besoins de l'UBT, puis comparée à la charge actuelle (équations 4.13 & 4.14).

$$H(t+1) = H(t) * [1+hB_v(t) - (m(t))] \quad \text{équation 4.13}$$

$$\text{où } H(t) = \frac{V_t(1-l)}{B_H * N_{jr}} \quad \text{équation 4.14}$$

$$\text{et } B_v(t) = 1 - e^{\frac{-c_r V(t)}{V_{\max}}} \quad \text{équation 4.15}$$

B_H = besoins de l'animal (kg MS. jour⁻¹UBT⁻¹),

$B_v(t)$ = taux de reproduction des animaux en réponse à la disponibilité de la biomasse,

c_r = coefficient de reproduction dépendant de la végétation,

h = taux de reproduction actuelle de l'UBT,

$H(t)$ = charge animale potentielle à l'instant t (en UBT.ha⁻¹),

l = proportion de biomasse perdue due au piétinement et à la décomposition,

$m(t)$ = taux de mortalité,

N_{jr} = nombre de jours,

$V(t)$ = biomasse primaire en kg MS par unité de surface,

V_{\max} = biomasse maximale que peut produire l'unité de terrain considérée.

Pour la zone de recherche, les valeurs suivantes sont considérées : 66 % pour c_r ; 50 % pour h et 35 % pour l . Les besoins journaliers sont de 6,25 kg MS. UBT⁻¹.

4.2.1.5 L'indice d'humidité du sol

Cet indice (équation 4.16) est calculé d'après le concept du potentiel d'interférence écologique entre le couvert végétal et la pluviométrie effective. Le potentiel d'interférence exprime l'effet combiné de tous les facteurs contribuant à l'intensité de l'interaction ou interférence (Wu et *al.*, 1985; Olson et *al.*, 1985; Sharpe et *al.*, 1985).

$$R_c(t) = \frac{a * C(t) * R(t)}{1/C(t) + 1/R(t)} \quad \text{équation 4.16}$$

a = facteur de normalisation.

4.2.1.6 La biomasse primaire et la biomasse maximale potentielle

La biomasse herbacée de 1986 est déduite de la relation de Devineau et *al.* (1986) :

$$V(t) = 0,216 * (100 * NDVI)^{1,7} \text{ à } r = 0,963 \text{ et } 22 \text{ degrés de liberté} \quad \text{équation 4.17}$$

Les données de biomasse herbacée de 1996 proviennent de la campagne de collecte des données in situ. Cette campagne qui a eu lieu de juillet à octobre 1996 a aussi concerné la biomasse ligneuse (quantité et qualité). Les observations ont porté sur les mêmes unités étudiées en 1986. L'étude de la biomasse herbacée a été réalisée selon la méthode traditionnelle de Godron et *al.* (1969) appliquée pour les formations tropicales (Achard, 1993). Cette méthode appelée méthode des "points quadrats alignés" permet de réaliser un échantillonnage suivi d'une analyse floristique et une estimation de la biomasse herbacée. Les prélèvements sont réalisés pendant la maturation des semences avant leur dissémination, c'est-à-dire au moment où la phytomasse peut être considérée comme maximale. En zone sahélienne, cette période reste généralement très courte : 1 à 2 décades entre fin août et mi-septembre.

La méthode consiste à recenser les présences des espèces à la verticale de points disposés régulièrement le long d'une corde graduée tendue au-dessus du tapis herbacé par des piquets.

Une lecture est effectuée à intervalle régulier le long du bord effilé d'une tige descendue verticalement. Plusieurs espèces peuvent être ainsi notées par point de lecture, mais chaque espèce n'est comptabilisée qu'une seule fois. Ceci permet alors de caractériser l'importance de chacune des espèces dans le tapis végétal en mesurant son recouvrement par l'observation des fréquences (analyse floristique). L'estimation de la production primaire de biomasse herbacée est réalisée par la méthode de la récolte intégrale. Elle consiste en des fauches d'herbes sur des placeaux de 1 m², matérialisés par un cadre en fer et répartis systématiquement à des intervalles de 20 m le long de transects définis de manière à intégrer toutes les hétérogénéités du terrain. Le poids vert est noté pour chacun des échantillons. L'échantillonnage sur transects est celui préconisé par Grouzis (1988), soit trente à quarante prélèvements par unité traversée par le transect. Un prélèvement de 3 kg de poids vert est effectué sur un mélange de plusieurs échantillons et séché à l'étuve à 85 (C jusqu'à obtention d'un poids constant représentant le poids en matière sèche. Une analyse bromatologique des échantillons prélevés permet ensuite d'estimer la qualité du fourrage, notamment sa teneur en azote (N), phosphore (P), UF (unité fourragère) et en MAD (matière azotée digestible).

L'inventaire floristique des ligneux est réalisé sur une surface d'un demi hectare à un emplacement représentatif de la formation étudiée : placeau de 100 m de long sur 50 m de large. Des mesures dendrométriques (hauteur, couronne, circonférence) et le comptage de toutes les espèces sont réalisés afin de déterminer la composition et la densité des ligneux par unité. La biomasse ligneuse est par la suite calculée à l'aide des relations allométriques. Pour les espèces dont la biomasse foliaire peut être calculée de plusieurs manières (réf. chapitre 3), une comparaison des résultats montre des variations importantes. Ce qui indique les limites de ces méthodes d'estimation. Afin de minimiser les erreurs, la biomasse foliaire calculée à partir du diamètre déduit de la circonférence du tronc mesurée in situ a été retenue. En effet, les résultats des relations qui se servent de la hauteur des individus sont plus sujets à des erreurs car celle-ci est estimée à la vue. Les erreurs ne sont cependant pas seulement dues aux mesures des paramètres physiques de l'individu mais aussi à son état végétal (élagué ou non, en stress ou non). L'évaluation de la biomasse fourragère provenant des branchettes et fruits exige des méthodes fastidieuses et dévastatrices. Les rapports provenant de la littérature permettent de limiter la destruction. Aussi, avons-nous retenu les rapports de Bille (1980) qui

estime à 250 g de fruits et 4,5 kg de branches par individu.

La production primaire maximale (V_{max}) désigne la production potentielle à laquelle peut parvenir le milieu si toutes les conditions étaient à l'optimum. Elle nécessite donc des données historiques importantes. La non disponibilité de telles données nous a emmené à l'estimer par analyse comparée de la productivité de la biomasse de parcelles mises en défens pendant quatre années (Grouzis, 1988) avec les productions maximales données par Toutain et Wispelelaere (1978) selon l'équation 4.18 :

$$V_{max} = \max (\max_{Grouzis}, \max_{Toutain}) \quad \text{équation 4.18}$$

Cette approche s'appuie sur l'hypothèse suivante : «dans les conditions sahéniennes, en absence de données lointaines et sans amendements particuliers, la production de biomasse végétale primaire d'une zone sahénienne mise en défens pendant plusieurs années consécutives (aucune exploitation agricole ou pastorale) peut être considérée comme potentielle (maximale), notant qu'au moins une année normale ait été observée durant cette période de mise en défens».

4.2.2 Modèle de Wu modifié : contribution des paramètres socioéconomiques et méthode de traitement

Comme exposé plus haut, le modèle de Wu considère quatre paramètres pour évaluer l'état écologique du milieu. Or, les conditions socioéconomiques qui ont un effet sur le milieu peuvent être intégrées dans l'approche afin de mieux évaluer la productivité du milieu (réf. § 1.3, chapitre 1). La contribution majeure de la présente recherche intervient donc à ce niveau. Ainsi, quatre autres paramètres liés à la population humaine et à sa situation sociale ont été intégrés dans le modèle pour tester cette hypothèse. Il s'agit de la pression agricole, de l'accessibilité aux soins de santé et à l'éducation et enfin de la disponibilité de l'eau d'abreuvement pour les animaux. La pression agricole traduit la densité de la population humaine et sa pression sur le milieu. La pression humaine sur le milieu est un élément complexe dont la quantification nécessite des séries de données détaillées sur plusieurs aspects du milieu, notamment la pédologie et le couvert végétal. Ne disposant pas de ces données,

nous avons considéré les zones à grands risques de dégradation mais subissant une pression agricole. Cette approche est justifiée par les relations directes existant entre densité humaine et superficie cultivée en milieu rural sahélien.

La prise en compte de ces paramètres est basée sur les hypothèses suivantes :

- une population alphabétisée est plus réceptive aux thèmes de vulgarisation se rapportant à la gestion à moyen ou long terme pour un développement durable. En effet, non seulement sa capacité de planification serait accrue mais aussi et surtout, elle serait plus ouverte à l'utilisation de méthodes de gestion innovatrices et appropriées visant une production pastorale de qualité et non de quantité;
- la santé est un facteur de lutte contre la désertification. En effet, la mise en œuvre des méthodes de restauration du milieu (construction de sites anti-érosifs, plantations d'arbres fourragers) exige des conditions acceptables de santé pour une meilleure contribution physique des populations (transport des pierres, creusage des trous, etc.).
- la mise en place d'un programme d'hydraulique pastorale permet d'éviter les fortes concentrations de bétail et le surpâturage autour des points d'eau.

Forts de ces hypothèses, les paramètres sociaux de la santé, de l'éducation et de l'eau apparaissent comme des facteurs positifs multiplicatifs tandis que la pression humaine, traduite par la surexploitation agricole, est analysée comme un facteur négatif. Les équations 4.4 & 4.5 sont redéfinies respectivement par les équations 4.19 & 4.20. La figure 5 traduit les modifications apportées.

$$I'_+(t) = R(t) * C(t) * I_{AS} * I_{AE} * I_{DE} \quad \text{équation 4.19}$$

$$I'_-(t) = [1 - C(t)] * \{ S + s * (\max(0, O_G(t)) + \max(0, I_{SAG}(t))) \} \quad \text{équation 4.20}$$

I_{AS} = indice d'accès à la santé,

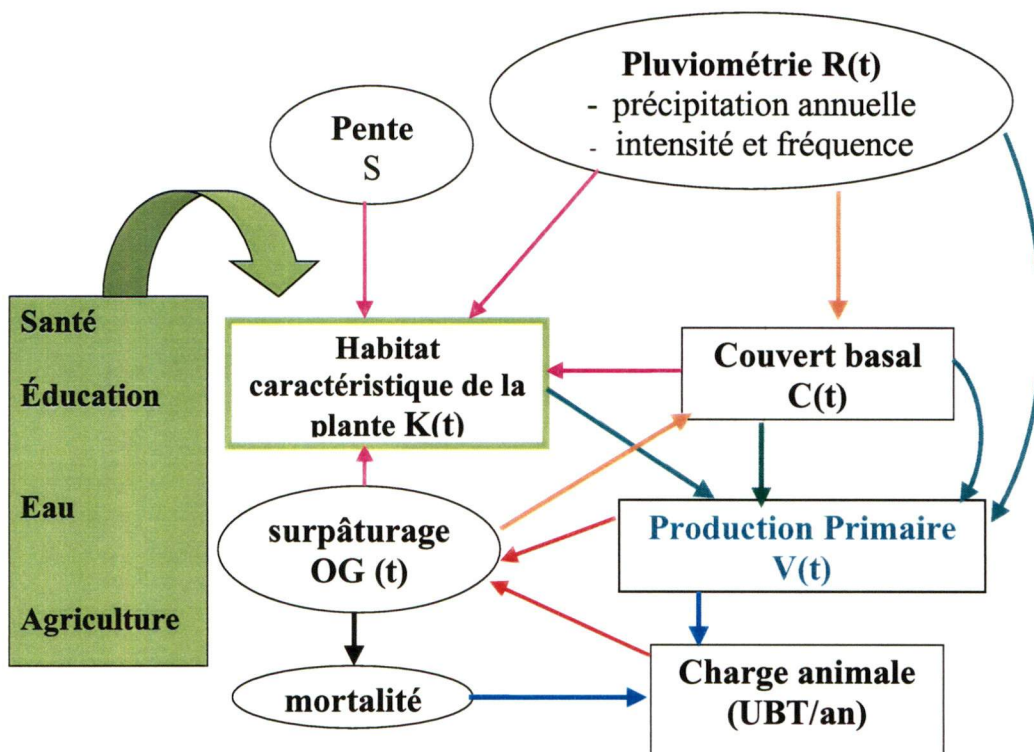
I_{AE} = indice d'accès à l'éducation,

I_{DE} = Indice de disponibilité d'eau pour le bétail,

I_{SAG} = indice de surexploitation agricole,

$s = 1,5$.

Figure 5 : Schéma du modèle de Wu modifié



4.2.2.1 L'indice de surexploitation agricole

L'indice de surexploitation agricole est calculé en considérant les 10 critères d'évaluation des terres pour l'agriculture pluviale au Sahel de la FAO (BUNASOLS 1989) selon la méthode de hiérarchisation multicritère (MHM) de Saaty (1984). Ces critères sont :

- la résistance à l'érosion (ér);

- les risques d'inondation (rin);
- les conditions de germination (ger);
- la facilité de travail du sol (trs);
- la disponibilité en eau (disE);
- la disponibilité en éléments nutritifs (dn);
- la capacité de rétention des éléments nutritifs (crn);
- les conditions d'enracinement (rac);
- la disponibilité en oxygène (oxy);
- l'excès de sels (sel).

Pour chacun de ces critères, un score est établi en fonction de son degré d'influence sur la propriété «surexploitation agricole» par comparaison par paire selon l'échelle ci-dessous indiquée, puis les poids sont évalués. L'approche s'appuie d'une part, sur l'aptitude des sols pour les cultures pluviales de la zone (travaux du BUNASOLS (1989) sur la définition des classes d'aptitude) et, d'autre part, sur les résultats de l'étude pédologique de Zombré (1996).

Tableau 8 : Échelle de comparaison binaire

1/9	1/7	1/7	1/3	
extrêmement	très	fortement	modérément	important
1	3	5	7	9
égal	modérément	fortement	très	extrêmement important

$$I_{SAG} = \sum \alpha_i (C_{SAG})_i \quad \text{équation 4.21}$$

α_i = poids du critère i,

$(C_{SAG})_i$ = critère de surexploitation agricole.

La carte-image obtenue est ensuite comparée à l'occupation des sols pour en déterminer les zones de surexploitation agricole à l'aide d'une fonction conditionnelle telle que :

$$Z_{SAG} = \text{iff} (I_{SAG} \neq 0 \text{ and } C_{OcSols} = \text{'culture'}, I_{SAG}, 0) \quad \text{équation 4.22}$$

Z_{SAG} = Zone de surexploitation agricole,

C_{OcSols} = carte d'occupation des sols.

La carte d'occupation des sols est celle de l'IRBET (1996) réalisée par interprétation de photographies aériennes au 1/50000.

4.2.2.2 Le niveau de santé et d'éducation de la population

L'évaluation de ces éléments est réalisée par combinaison de leur niveau d'accessibilité. Ce dernier est une fonction de la proximité des infrastructures et de la disponibilité en personnel de santé ou du taux de scolarisation en matière d'éducation. Nous admettons ainsi que la distance est un facteur important pour la fréquentation de ces infrastructures sociales.

$$I_{AS} = I_{PPi} * I_{PS} \quad \text{équation 4.23}$$

$$I_{AE} = I_{PPi} * T_{sc} \quad \text{équation 4.24}$$

I_{PPi} = indice de proximité,

I_{PS} = indice de disponibilité en personnel de santé,

T_{sc} = taux de scolarisation.

La proximité des infrastructures est définie par approche floue selon la formulation suivante :

$$I_{PPi} = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq d_r \leq d_{id} \\ \frac{d_{max} - d_r}{d_{max} - d_{id}} & \text{si } d_{id} \leq d_r \leq d_{max} \\ 0 & \text{si } d_{max} \leq d_r \end{cases} \quad \text{équation 4.25}$$

I_{PPi} = indice de proximité du paramètre considéré,

- d_r = distance actuelle,
 d_{id} = distance idéale,
 d_{max} = distance maximale.

Les distances idéale et maximale sont celles utilisées par les Ministères de la Santé et de l'Éducation du Burkina Faso. Elles sont respectivement de 7 et 10,5 km pour la santé; 3 et 5 km pour l'éducation.

L'évaluation de la disponibilité en personnel de santé suit les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour le Sahel (réf. tableau 6, chapitre 3).

$$I_{P_s} = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{NP_i}{PV_T * Norme} \right) \alpha_{pi}}{k \sum_{i=1}^k \alpha_{pi}} \quad \text{équation 4.26}$$

- NP_i = nombre du type de personnel considéré,
 PV_T = population totale,
 α_{pi} = poids pour le type de personnel considéré ,
 k = nombre de paramètres considérés (type de personnel).

Pour les pays en voie de développement, le PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement) utilise plusieurs types d'information pour l'évaluation du niveau d'éducation d'un pays ou d'une région donnée. En effet, il considère l'indice d'alphabétisation des adultes et un taux de scolarisation (T_{SC}) combinant les niveaux primaire, secondaire et tertiaire (PNUD, 1998). Pour la présente recherche, seul le niveau primaire est considéré, car les 2 autres sont insignifiants dans la zone de recherche et les données sur l'éducation des adultes ne sont pas disponibles. Le taux de scolarisation est simplifié par l'équation 4.27 :

$$T_{SC} = \frac{N_{SC}}{N_{pSC}} \quad \text{équation 4.27}$$

T_{SC} = taux de scolarisation,

N_{SC} = nombre d'enfants scolarisés,

N_{pSC} = nombre d'enfants scolarisables (7-14 ans).

4.2.2.3 *L'hydraulique pastorale*

L'indice d'accès aux points d'eau est calculé par interpolation en considérant les points d'eau naturels (mares), les puits, les forages et les boullis selon l'approche floue par la distance (équation 4.25). Les normes d'évaluation utilisées au Burkina Faso sont respectivement de 3 et 12,5 km pour d_{id} et d_{max} . Une étude de sensibilité est réalisée pour apprécier ces bornes.

Un tableau guide de la méthode de simulation de la biomasse primaire intégrant les différents paramètres la production est donné en annexe 1-A.

4.3 **Données satellitaires : disponibilité et méthodes de traitements**

Les données expérimentales pour la présente recherche renforcent notre problématique quant à leur disponibilité, leur qualité et leur validité. En effet, trois types d'images satellitaires : SPOT, LANDSAT et RADARSAT étaient initialement prévues comme sources d'information satellitaires. Mais seulement deux images SPOT de bonne qualité (période et clarté) couvrant la zone d'étude étaient disponibles bien que nous ayons le financement pour acquérir des images multi-sources (LANDSAT, SPOT, RADARSAT) :

- scène SPOT XS du 09 août 1986 (gracieuseté de l'ORSTOM);
- scène SPOT XS du 23 octobre 1996 (gracieuseté du projet EDOT).

L'image du 14 août 1996, offerte par le programme EDOT du Centre canadien de télédétection, présentait un taux de couverture nuageuse élevé. La figure 6 montre la couverture géographique de ces images. Les images SPOT ont été traitées selon les méthodes conventionnelles (figure 7) : corrections atmosphériques et corrections géométriques. Pour les corrections atmosphériques, la non disponibilité de certains paramètres du code 5S nous a

amené à appliquer le modèle de calcul du NDVI de Guyot et Gu (1994). Ces derniers ont montré que les corrections atmosphériques augmentaient de près de 24 % la gamme dynamique du NDVI. Ce qui conduit à une meilleure discrimination des éléments de la surface terrestre. Ils ont, à cet égard, défini les relations 4.28 & 4.29 telles que :

$$\text{NDVI}_{\rho} = 1,231 * \text{NDVI}_{\rho^*} - 0,009 \quad \text{équation 4.28}$$

$$\text{NDVI}_{\rho^*} = \frac{\text{DC}_{\text{NIR}} - 0,663\text{DC}_{\text{R}}}{\text{DC}_{\text{NIR}} + 0,663\text{DC}_{\text{R}}} \quad \text{équation 4.29}$$

NDVI_{ρ^*} = NDVI déterminé à partir de la réflectance apparente au niveau du satellite,

NDVI_{ρ} = NDVI au niveau du sol,

DC_{NIR} = compte numérique dans le proche infrarouge,

DC_{R} = compte numérique dans le rouge.

Les corrections géométriques ont été réalisées à l'aide de la carte topographique au 1/200 000 numérisée. Puis une correction d'image à image a été réalisée en se servant de l'image d'août 1986 comme base pour les autres images (août et octobre 1996). Par ailleurs, une classification dirigée des images par maximum de vraisemblance a permis de retenir pour le département d'Oursi 14 classes d'occupation du sol dont 2 (Rochers et Dune vive) sans valeur pastorale.

4.4 Vérification des modèles et validation

La cohérence interne du programme de simulation traduit de manière correcte le modèle conceptuel élaboré dans la phase de la modélisation (Coquillard et Hill, 1997). Nous avons procédé à une vérification des algorithmes utilisés à chaque étape : acquisition, spatialisation des données, et simulation. Le but essentiel ici est d'évaluer la pertinence des variables et paramètres d'échelle utilisés. Pour ce faire, le modèle est appliqué sur des échantillons de zones tests représentatifs des principales UP et les résultats préliminaires sont analysés. Puis,

la validation des résultats est effectuée à l'échelle globale par approche graphique et statistique. La validation du modèle est une étape importante de la tâche complexe de la simulation. Nous retiendrons la définition de McKinion et Baker (1982) : «*la validation est une comparaison des prédictions avec le monde réel pour déterminer si le modèle est adéquat pour buts poursuivis*». Des tests de comparaison des moyennes selon la loi normale centrée réduite ont, pour cela, été effectués sur la base des résultats respectifs des modèles de Wu standard et de Wu modifié agrégés par UP. Les données de référence sont les données réelles des mesures *in situ* de 1996. En d'autres termes, ces analyses s'appuient sur les différences entre les valeurs observées et celles simulées. Une analyse de variance est alors effectuée sur la base d'un échantillonnage systématique au pas de 60 m (fenêtres de 3x3 pixels) à l'aide de l'erreur quadratique moyenne (équation 4.30). L'échantillonnage est réalisé sur un transect nord-sud de 4 km.

$$ERQM = \sqrt{\left\{ \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right\}}$$

équation 4.30

y_i = valeur observée,

\hat{y}_i = valeur simulée.

Figure 6 : Province de l'Oudalan : disponibilité des images satellitaires SPOT

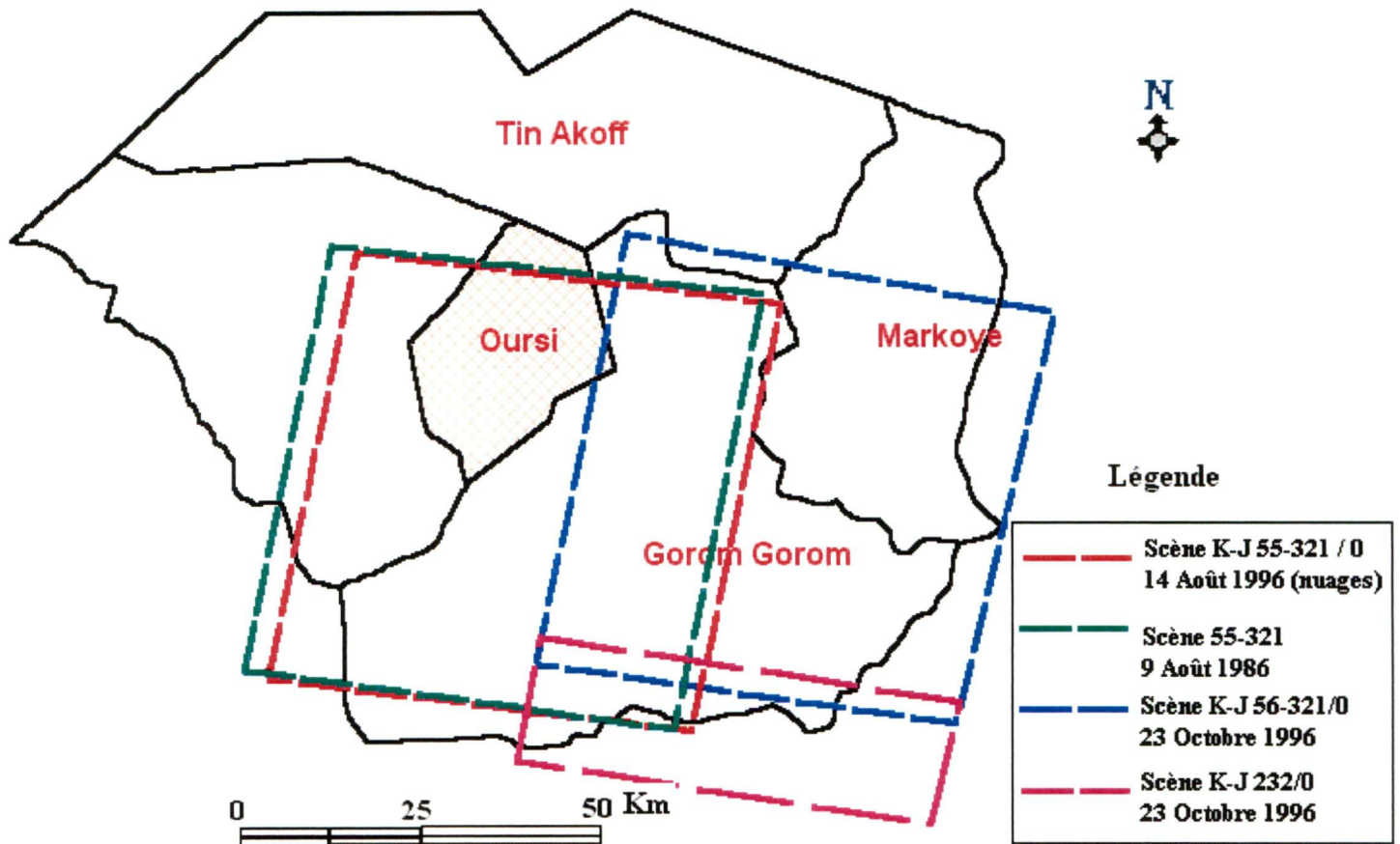
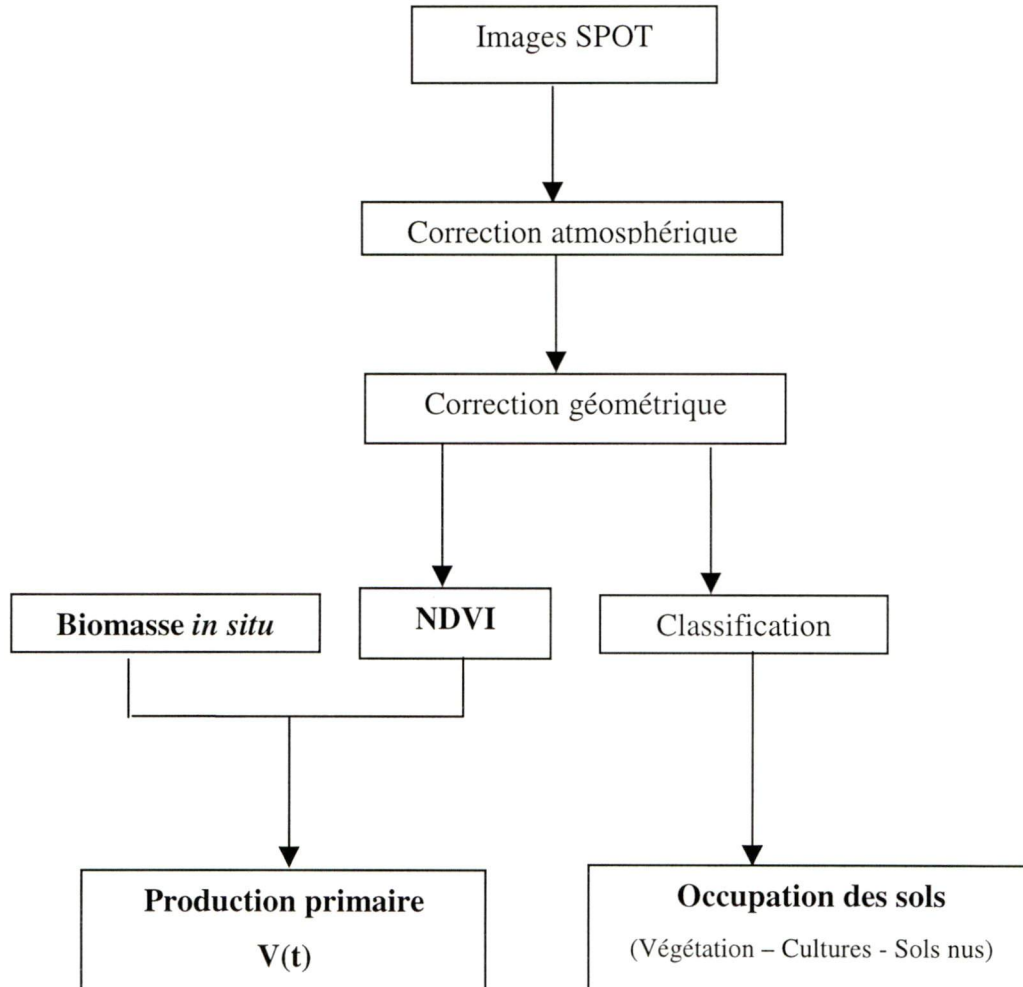


Figure 7 : Évaluation de l'occupation des sols et de la biomasse primaire par télédétection



4.5 Élaboration des scénarios d'aménagement et de gestion

Les scénarios d'aménagement et de gestion ont été élaborés à partir des besoins quantitatifs et qualitatifs des animaux selon le disponible fourrager (annexe 1-B). Les produits d'élevage visés sont le lait et la viande dans un cadre d'exploitation optimale et durable.

Deux scénarios ont été investigués et analysés. Dans le premier scénario, toutes les UP sont exploitées de manière rationnelle selon les saisons et la capacité de charge potentielle. Dans le second scénario, toutes les zones dégradées (glacis et zones gravillonnaires) sont soustraites de

la pâture. Pour ce faire, tout d'abord, les besoins alimentaires d'entretien et de production déterminés à partir de la littérature sont évalués selon le type de production. Le nombre de têtes de bétail considéré pour chaque type de production est défini en fonction de la composition des troupeaux (réf. § 3.3.3). Une proportion de 50 % des mâles pour la production de viande est considérée, tandis que la totalité des femelles reproductrices intervient dans la production de lait. Les besoins sont ensuite comparés à la fois à la quantité et à la qualité du fourrage disponible. La quantité de fourrage considérée résulte de la simulation de la biomasse pour la dixième année qui correspond à l'année 1996. Sa qualité (teneur en UF et en MAD) est issue des analyses bromatologiques. L'évolution temporelle de la qualité de la biomasse primaire est décrite dans la littérature. Les travaux de Le Houérou (1980) ont été essentiellement exploités. Les valeurs nutritives des principales espèces dominantes de chaque UP sont définies sur la base des résultats de l'analyse de présence et d'abondance décrite plus haut. L'utilisation de ce type d'approche se justifie par la non disponibilité de données *in situ* sur la variation temporelle de la qualité de la biomasse.

Enfin, les circuits et les zones potentiels pour la transhumance sont déterminés à partir de quatre critères : la disponibilité en eau, le niveau de surpâturage, le niveau de surexploitation agricole et la production primaire. Pour chaque critère, des bornes sont déterminées. Ainsi, le niveau de production primaire acceptable est déterminé de manière à ce qu'il corresponde à la charge optimale de $0,2 \text{ UBT} \cdot \text{ha}^{-1}$ définie par Kessler (1994).

Le schéma de la figure 8 illustre le modèle conceptuel de la présente recherche dont la réalisation passe par une phase d'acquisition des données en vue de l'élaboration des modèles de données en accord avec les objectifs définis au chapitre 1 :

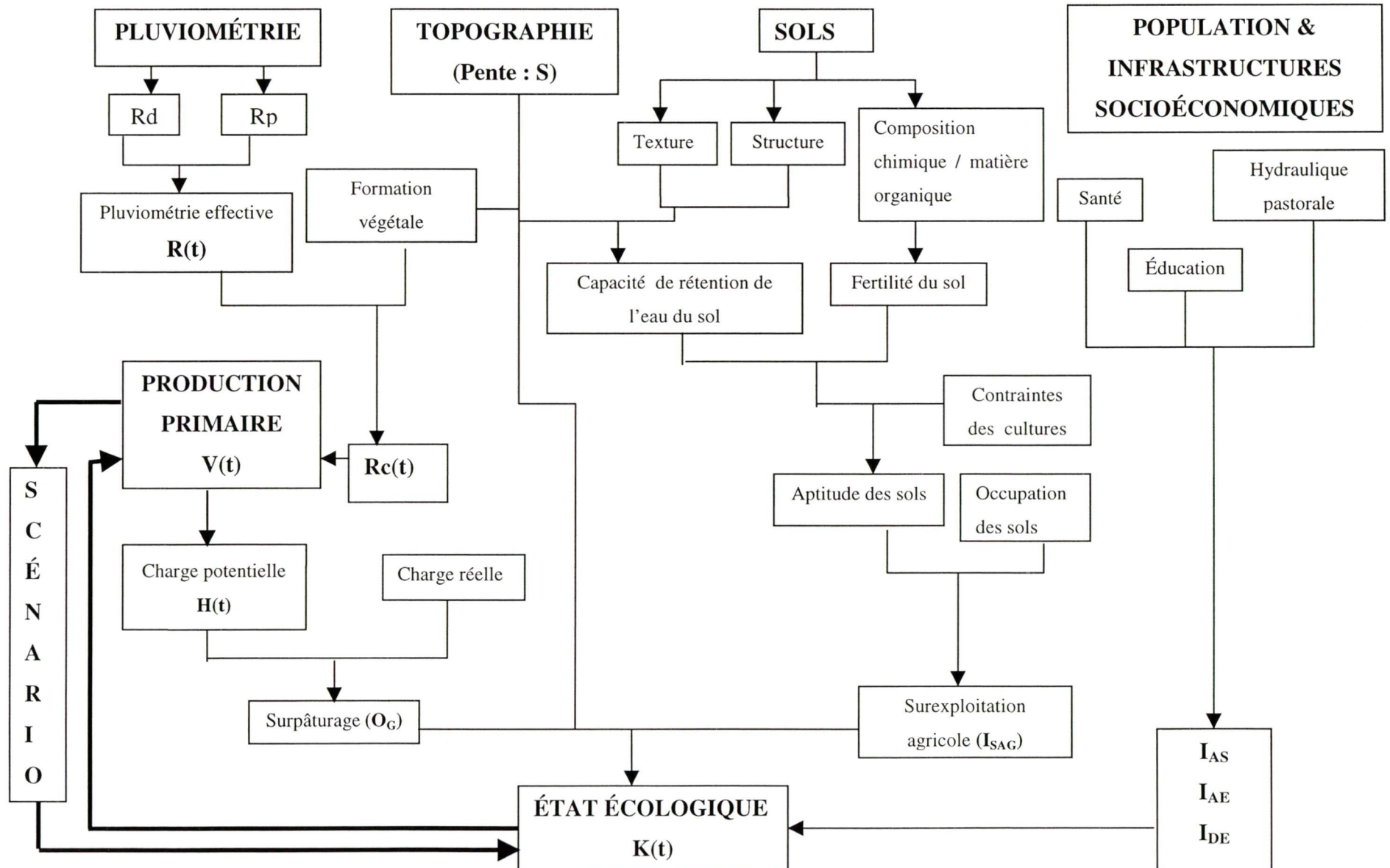
- définition de l'état écologique du milieu à partir d'indices climatiques, biologiques, physiques et socioéconomiques déterminés à l'aide de paramètres et variables variés et complexes;
- définition de la productivité primaire à partir de l'action combinée de ces indices;
- définition de scénarios d'aménagement du milieu à partir de la productivité du milieu.

4.6 Zone d'application de la recherche

La recherche s'applique à un écosystème pastoral sahélien et concerne plus spécifiquement le département d'Oursi, situé dans la province de l'Oudalan au nord-est du Burkina Faso. De par sa situation géographique, cette région réunit tout un environnement socioéconomique et écologique lui conférant la particularité des milieux pastoraux sahéliens (Claude et *al.*, 1991). Ces milieux sont marqués par une forte aridité, une longue saison sèche de 9 mois, une forte intensité de l'évaporation, une grande variabilité mensuelle et journalière des températures et une irrégularité des pluies caractérisée par une haute variabilité spatiale et temporelle à la fois inter et intra-saisonnière. Cette dernière caractéristique influence aussi bien les géodynamiques, phytoécologiques et agropastorales que le mode de vie des populations.

Du point de vue de la végétation, elle est constituée d'une strate herbacée à base de plantes annuelles à cycle court et d'une strate arbustive plus ou moins importante. Les principales formations sont les steppes et les brousses tigrées dégradées. Les sols sont reconnus carencés en azote, phosphore et potassium. La principale activité de cette région est l'élevage de ruminants (bovins, ovins, caprins, camelins et asins) suivie par l'agriculture et l'artisanat. La présence de mares pérennes (Oursi et Yomboli) constitue des facteurs de production mais aussi de dégradation de la zone.

Figure 8 : Schéma conceptuel de l'interaction des paramètres socio-biophysiques



CHAPITRE 5 PRÉSENTATION, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

5.1 Spatialisation des données et paramètres intrants des modèles

La modélisation de la production de biomasse implique une base de données (spatiales ou non) composée de variables décrivant les paramètres des modèles (Wu standard et Wu modifié). Les paragraphes qui suivent, décrivent les résultats de la spatialisation et de l'estimation des différentes variables et constantes intrants des modèles. Il faut noter que l'année d'initialisation de la simulation est 1986.

5.1.1 *La pluviométrie*

L'observation de la distribution interannuelle de la pluie révèle la grande irrégularité spatiotemporelle de ce paramètre. L'annexe 2.A a été élaborée à partir des données de 11 années d'observation. Elle qualifie les années selon les critères de répartition quantitative (annexe 2.B) de la pluviométrie et montre bien ce caractère irrégulier de la pluviosité : les années sèches, normales ou humides se répartissent de manière aléatoire. La modélisation du paramètre «pluviométrie» selon les probabilités de distribution aléatoire est donc justifiée. Il faut néanmoins noter que les qualifications d'année normale, sèche ou humide restent relatives et dépendent du nombre d'années d'observation. Par exemple, pour le poste de Gorom qui dispose de données sur une longue période (42 années consécutives), une classification des années pour cette période (annexe 3), qualifie les années 1986 et 1988 de sèches alors que l'analyse sur 11 années les classe en années normales. En effet, sur 42 ans les limites inférieures des classes des années sèche, moyenne et humide correspondent respectivement à 310 mm, 425 mm et 510 mm, alors que sur les 11 années actuellement observées, ces limites sont seulement de 302, 377 et 452.

Les relations 5.1 & 5.2 expriment respectivement les indices de distribution et de précipitation qui définissent la quantité et la qualité de la pluviométrie pour Oursi. Ces relations sont les résultats des analyses et calculs réalisés à partir des données de pluviométries décadaires et annuelles de 1986 à 1996 (figure 9).

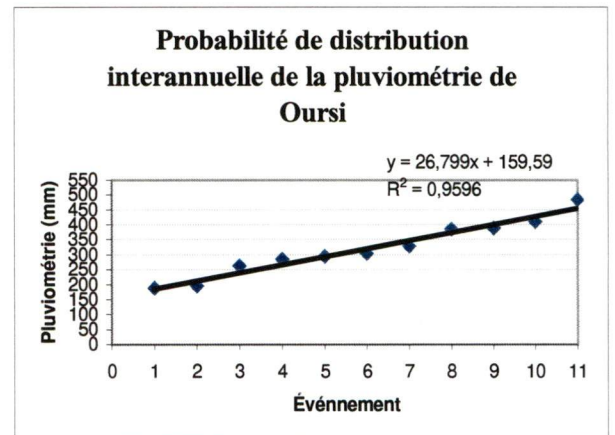
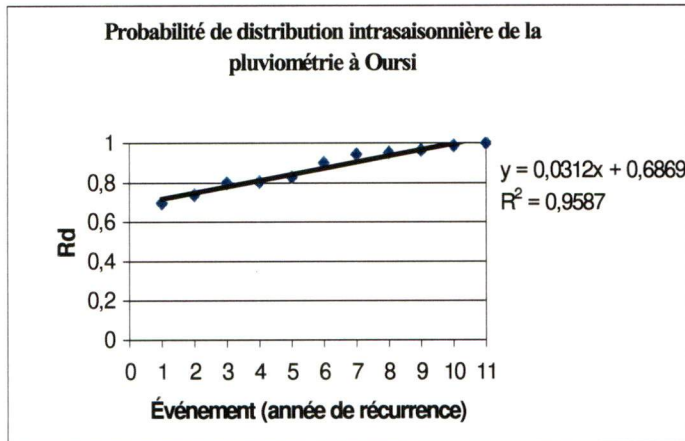
$$R_d(t) = 0,0312 * RDN + 0,6131 \quad (R^2 = 97 \%) \quad \text{équation 5.1}$$

$$R_p(t) = (26,78 * RDN + 159,6) / 454,38 \quad (R^2 = 96 \%) \quad \text{équation 5.2}$$

R^2 = coefficient de détermination.

La pluviométrie de référence est calculée sur la base des indices de distribution et de précipitation des années normales par application de l'équation 4.12. La valeur moyenne obtenue est de 0,5974.

Figure 9 : Distribution de la pluviométrie à Oursi



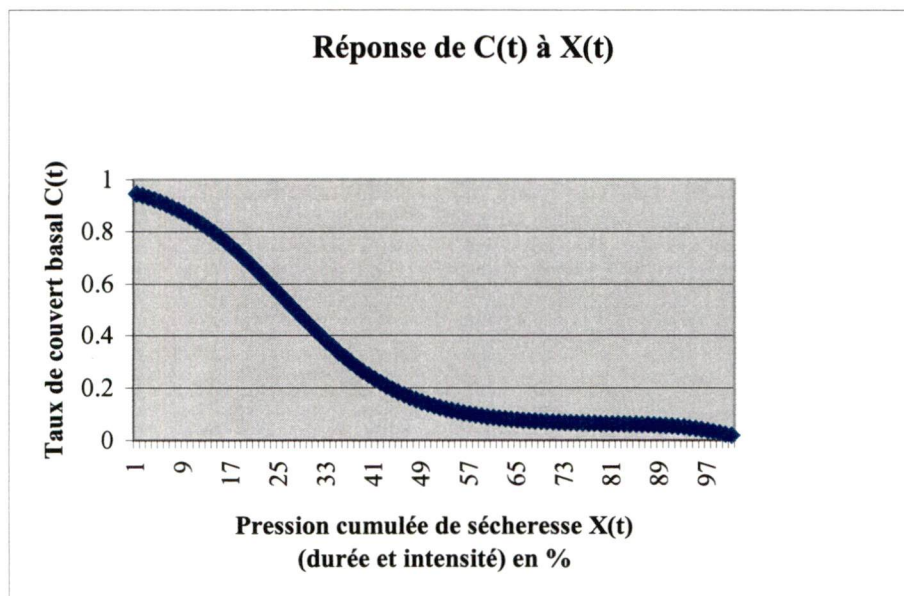
5.1.2 La couverture basale et l'état de sécheresse

5.1.2.1 La couverture basale initiale

La figure 10 représente la variation de la pression de sécheresse en fonction de la couverture basale : une pression de sécheresse de 25 % entraîne une détérioration de la moitié de la couverture basale de la végétation tandis qu'à 40 %, le taux de couvert basal est de 20 %. La pression de sécheresse cumulée initiale (X_0) correspond à celle de 1986. Elle résulte de l'interaction avec $C_{(0)}$ telle que $C_{\text{initial}} = C_0 = C_{1986}$ (C_{1986} provient des données *in situ* 1986). Par ailleurs, pour un taux maximum de sécheresse (lorsque $X(t) \rightarrow 1$) la dénudation du sol est au maximum ($C(t) \rightarrow 0$). La limite tolérable du taux de couverture basale décroît de manière exponentielle en fonction de la pression cumulée de sécheresse (équation 5.3). En dessous de 40 % de couverture basale, on peut estimer que la productivité primaire du milieu n'est plus optimale, ce qui signifie en d'autres termes, que la pression cumulée de sécheresse ne doit pas dépasser les 33 %.

$$C_{(0)} = \frac{0,96}{1 + e^{(15*(X(0)-0,25))}} + \frac{0,06}{1 + e^{(40*(X(0)-0,975)}} \quad \text{équation 5.3}$$

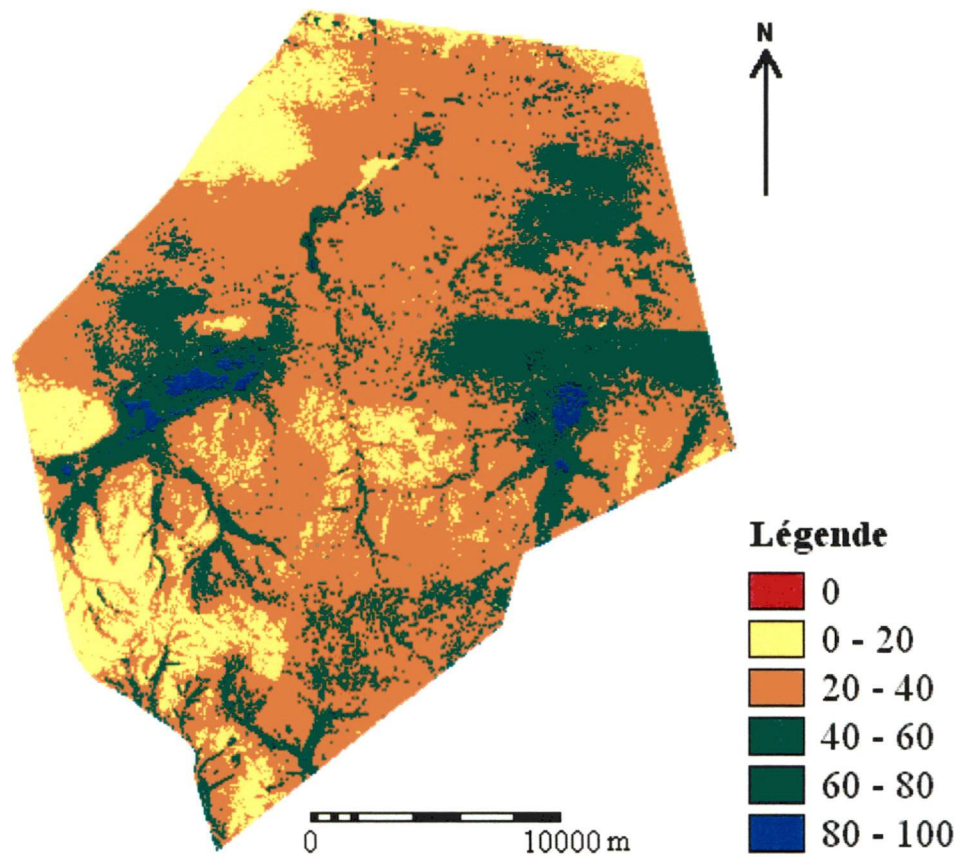
Figure 10 : Réponse du couvert basal à la sécheresse



La carte-image de la figure 11 montre le taux de couverture basale de la zone d'étude pour l'année 1986. Elle est issue de la relation établie par Devineau (1986) entre l'indice de végétation et le recouvrement végétal du sol (équation 5.4) :

$$C(t) = \frac{NDVI - 125,27}{0,188} \quad \text{équation 5.4}$$

Figure 11 : Carte-image du taux de couverture basale de 1986 (en %)



5.1.2.2 L'état de sécheresse

Les variables déterminant la variation de la sécheresse (ΔX) définies par l'équation 4.8 sont les pluviométries effective actuelle (R_t) et de référence (R_{ref}), les pressions animales actuelle (GP) et de référence (GP_{ref}) ainsi que le surpâturage (O_G) à partir desquelles l'état de sécheresse (DS) est analysée.

Les cartes-images des figures 12 et 13 montrent respectivement la charge animale réelle spatialisée et la charge de référence. La première résulte de l'interpolation, par la méthode de Voronoi, suivie d'un simple croisement de la carte-image ainsi obtenue avec l'attribut «charge réelle» de la base de données. La charge de référence est, quant à elle, déduite de la capacité de charge moyenne par unité pastorale sur la base des données de biomasse de 1977, 1986 et 1996. Il faut noter que les résultats d'une telle approche constituent une approximation grossière de la réalité spatiale en l'absence de carte des limites des villages. En effet, elle consiste à déterminer pour chaque pixel des distances euclidiennes vers tous les points et à lui assigner la valeur du point ayant la plus faible distance en se basant sur les points représentant les villages sur la carte topographique de base. La délimitation qui en découle ne reflète pas tout à fait la réalité.

Le tableau 9 indique la charge animale par village pour le département d'Oursi pour l'année 1986. Ces résultats sont issus de l'extrapolation des données du recensement du bétail de 1989 et basés sur le taux de croît annuel des statistiques nationales par espèce animale : 2 % pour les bovins, 3 % pour les ovins et caprins, 2 % pour les asins et camelins et enfin 1 % pour les équins. L'analyse de ce tableau montre que la moyenne de charge animale du département d'Oursi ($0,15 \text{ UBT} \cdot \text{ha}^{-1}$) se situe dans les limites acceptables des critères d'exploitation durable des milieux sahéliens dans le système d'élevage transhumant ($0,2 \text{ UBT} \cdot \text{ha}^{-1}$) définis par Kessler (1994). Cependant, la présence de mares comme celles d'Oursi et de Yomboli attire les animaux des provinces voisines et même des pays voisins (Mali). D'après les services de l'Élevage, la zone reçoit jusqu'à 3000 têtes de bétail étranger surtout en saison sèche. Par ailleurs, on remarque que les villages de Yomboli, Tin Edia et Fetel Gaoudi présentent des charges animales de plus de $0,30 \text{ UBT} \cdot \text{ha}^{-1}$, ce qui est supérieur à la limite de durabilité admise.

Tableau 9 : Charge réelle du département d'Oursi (1986)

Village	Population 1986	Superficie (ha)	Densité (Hbts.km ⁻²)	UBT	Charge réelle (H(t))	
					ha.UBT ⁻¹	UBT.ha ⁻¹
Bangonadji	684	4949	13,83	788	6,3	0,16
Boullel	949	12566	7,55	1092	11,5	0,09
Dialafanka	817	6690	12,21	940	7,1	0,14
FetelGaoudi	298	1146	25,98	343	3,3	0,3
Kolel	935	10516	8,89	1077	9,8	0,1
Oursi	1270	8660	14,66	1462	5,9	0,17
Sokoudou	562	3512	16	647	5,4	0,18
TinEdia	597	2045	29,17	687	3	0,34
TinHiguel	527	8299	6,35	607	13,7	0,07
Yomboli	1201	3621	33,15	1382	2,6	0,38
Total	7840	62002	12,40	9023	6,87	0,15

Figure 12 : Carte-image de la charge animale spatialisée en UBT.ha⁻¹ du département d'Oursi

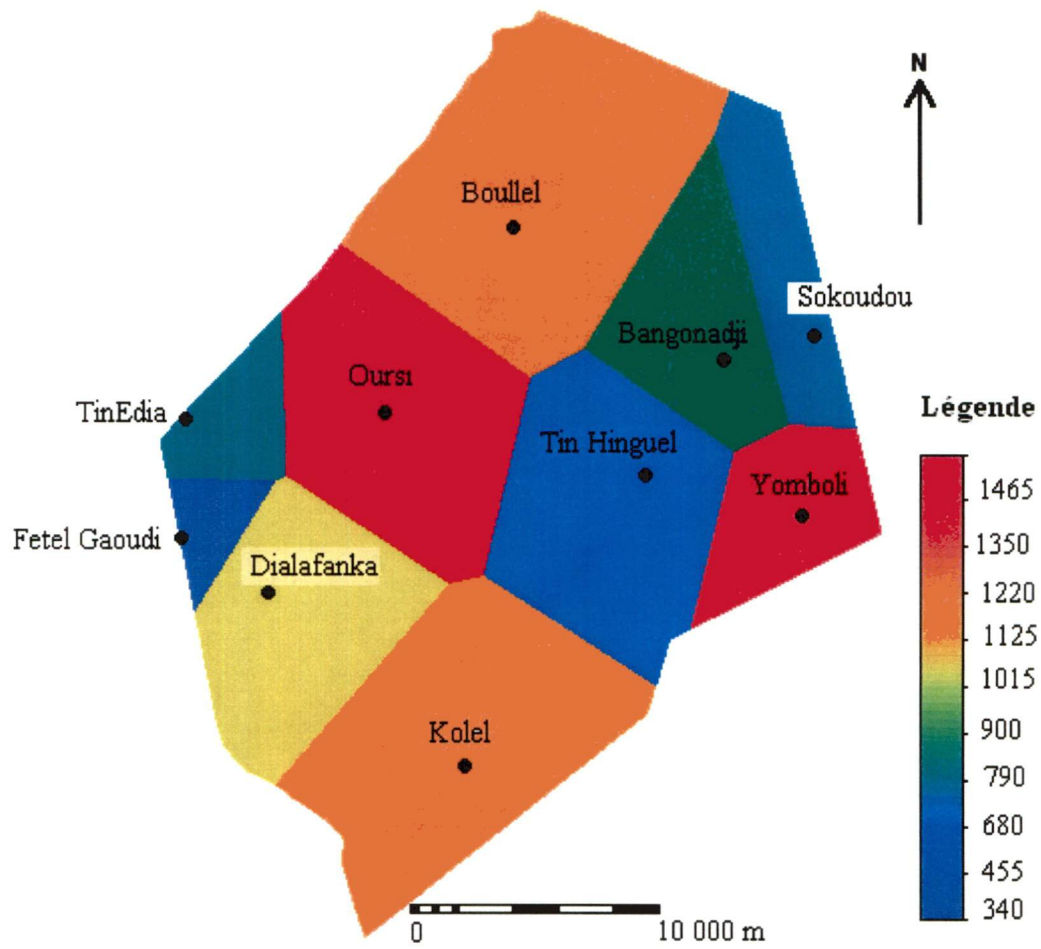
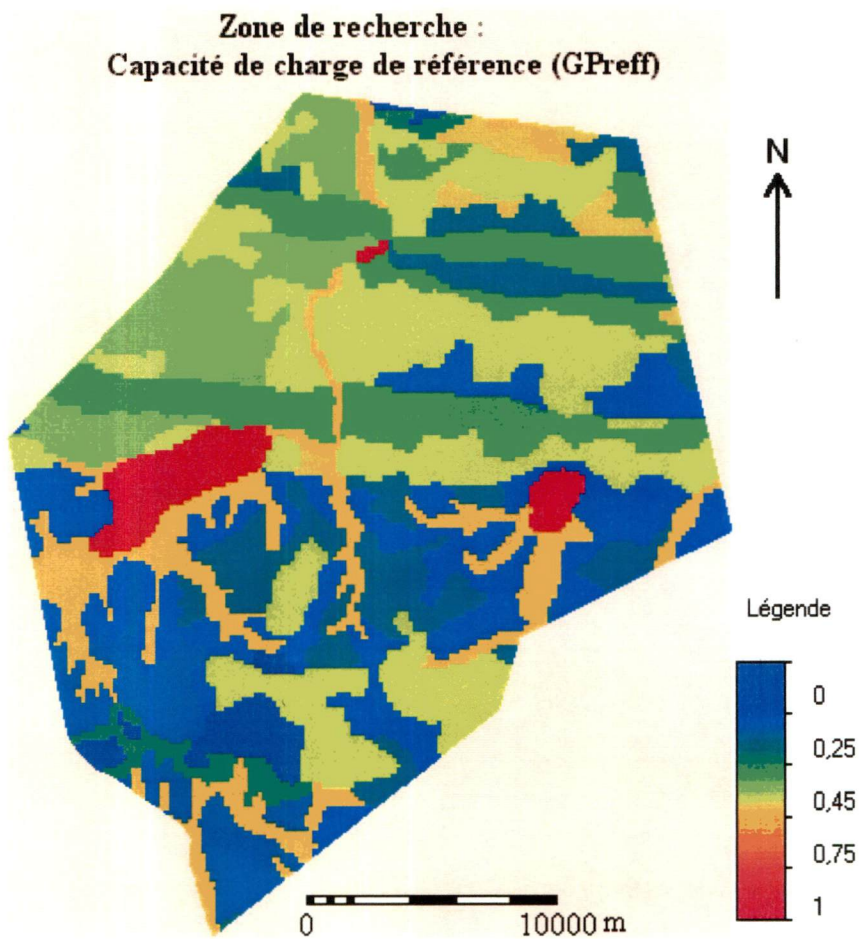


Figure 13 : Carte-image de la capacité de charge de référence



5.1.3 La biomasse herbacée (initiale & maximale) et la biomasse ligneuse

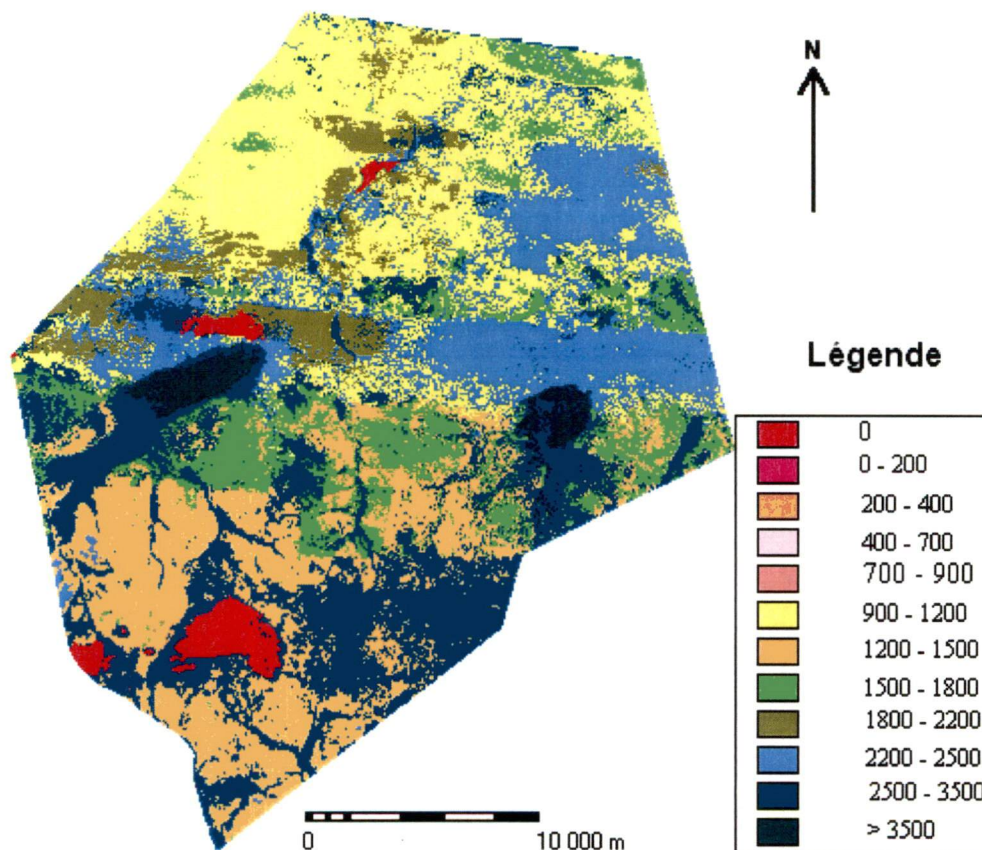
L'application de l'équation 4.17 à l'image SPOT de 1986 donne la biomasse initiale (V_0). L'agrégation selon l'occupation des sols permet d'obtenir la production par unité UP (tableau 10). La composition floristique des UP est donnée à l'annexe 4 et la figure 14 présente les résultats de l'application de l'équation 4.18 pour la détermination de la biomasse maximale (V_{max}). D'une manière générale le potentiel de production primaire est élevé : 1500 à 4500 kg.MS.ha⁻¹. Naturellement, ce sont les UP des zones hydromorphes et celles des dunes qui présentent le plus grand potentiel. Mais pour la quasi totalité des UP, la production primaire actuelle représente moins de la moitié de ce potentiel et reste très variable sur le plan spatial et

temporel. La biomasse ligneuse par UP (feuilles + fruits + branchettes), évaluée par application des modèles de relations allométriques, présente aussi une grande variabilité spatiale.

Tableau 10 : Productivité primaire et potentielle de la zone d'étude (en kg.MS.ha⁻¹)

Biomasse	Dunes et ensablements			Glacis			Zones gravillonnaires		Cultures	Vallées & zones hydromorphes	
	Ab	Aa	Ae	Ba	Bb	Bc	Dc	Db	JC	Ma	McHb
Herbacée 1986 (V ₀)	709	900	791	427	582	583	580	615	677	1413	1036
Écart type (V ₀)	75	117	133	43	117	162	99	88	177	293	312
Potentielle Vmax	2200	2400	3200	2500	1500	3000	1600	2500	2700	4500	3500
Biomasse ligneuse	89	162	180	47	27	70	153	194			450

Figure 14 : Carte-image de potentiel de production primaire (Vmax en kgMS.ha⁻¹)



5.1.4 La biomasse herbacée de 1996

La biomasse de 1996 résultant de trois modes de calcul figure au tableau 11. L'application des relations liant la biomasse au NDVI montre des écarts très prononcés par rapport à la production observée. On note une surévaluation de la biomasse calculée au niveau des glacis et des zones gravillonnaires et une sous-estimation dans les dunes et les zones hydromorphes et ce, malgré le taux de corrélation significatif (équation 5.5 & figure 15).

$$V(1996) = 5707,6 * NDVI - 969,09 \quad (R = 84\% \text{ avec } 28 \text{ degrés de liberté}) \quad \text{équation 5.5}$$

La mauvaise qualité de l'image de 1996 n'ayant pas permis une correction atmosphérique a induit des erreurs dans l'estimation du NDVI. Par ailleurs, la relation 4.17 de Devineau et *al.* (1986) établie avec les seules données de 1986 ne permet pas sa généralisation.

Figure 15 : Relation entre NDVI et biomasse primaire (1996)

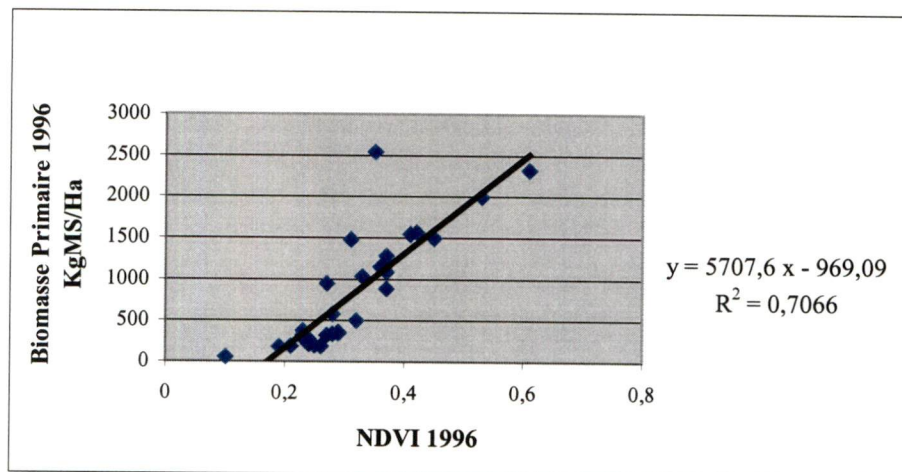


Tableau 11 : Comparaison de la biomasse herbacée de 1996 selon 3 méthodes d'évaluation (en kg MS.ha⁻¹)

Méthode	Ab	Aa	Ae	Ba	Bb	Bc	Dc	Db	JC	Ma	McHb	R	DV
Relation 4.17	787	889	636	658	737	909	700	765	745	832	1169	0	589
Relation 5.4	986	834	644	666	761	979	704	816	772	1466	1257	577	
<i>in situ</i>	975	1064	1480	356	380	580	220	356	950	2350	1700		

5.1.5 L'indice caractéristique du milieu

À l'état de climax, l'indice caractéristique du milieu (K) serait égal à 1. Cet état correspondrait à l'état d'une communauté végétale ayant atteint un stade d'équilibre durable avec les facteurs climatiques et édaphiques du milieu, en l'absence d'intervention humaine (Sylvain Parent, 1990). L'évaluation de l'état du milieu paraît assez hasardeuse et reste dans le domaine de la subjectivité. En effet, les nombreux facteurs dont il dépend sont très difficiles à quantifier. Pour certains auteurs comme Lange et *al.* (1994), l'étude temporelle de la variation de la composition floristique permet de le définir en un instant t donné. Une telle approche nécessite des suivis à très longs termes, ce qui n'est pas le cas au Sahel : on ne dispose pas de données historiques suffisamment fournies à cet égard. Une valeur initiale de 0,5286 a été assignée à K(1986) à la suite de tests dans les zones d'indice d'humidité maximale (Rc=1). Cette valeur semble raisonnable compte tenu de l'état de dégradation du milieu sahélien et de son état d'exploitation excessive actuelle.

5.1.6 La surexploitation agricole

Le tableau 12 définit les scores établis en fonction du degré d'influence des critères sur la propriété «surexploitation agricole» par comparaison par paire selon l'échelle de Saaty (1984) (réf. § 4.2.2). Les poids des différents critères sont exprimés par l'équation 5.6 :

$$I_{SAG} = 0,08 \text{ ér} + 0,04 \text{ rin} + 0,06 \text{ ger} + 0,08 \text{ trs} + 0,15 \text{ disE} + 0,18 \text{ dn} \\ + 0,19 \text{ crn} + 0,06 \text{ rac} + 0,02 \text{ oxy} + 0,01 \text{ sel} \quad \text{équation 5.6}$$

I_{SAG} = indice de surexploitation.

L'indice de cohérence (IC), qui sert de validation pour les résultats obtenus par la MHM de Saaty, est de 0,15. Ce qui correspond à un ratio de cohérence (RC) de 0,10 qui est dans la limite acceptable. Le ratio de cohérence mesure la cohérence globale des appréciations telle que:

$$RC = \frac{IC}{ICA} \quad \text{équation 5.7}$$

ICA = indice de consistance aléatoire;

ICA =1,49 pour une matrice de 10 (Saaty, 1984).

Les différents critères sont représentés spatialement par les cartes-images de l'annexe 5 basées sur les classes d'aptitudes (annexe 6). L'application de la fonction 5.5 détermine les zones inaptes à l'agricole. Les critères sont élaborés à partir de la carte des sols (figure 16 en fonction des exigences des cultures (annexe 7). Les zones de surexploitation agricole figurent sur la figure 17. On remarque que les zones surexploitées sur le plan agricole se situent principalement dans les zones hydromorphes. Ceci rend compte de la compétition entre l'homme et l'animal car ces zones sont traditionnellement réservées à la pâture.

Tableau 12 : Scores des critères

Critère / Score	ér	rin	ger	trs	disE	dn	crn	rac	oxy	sel
ér	1									
rin	1/9	1								
ger	1/3	1/7	1							
trs	5	5	5	1						
de	3	3	1/3	7	1					
dn	3	7	5	9	1	1				
crn	3	7	5	9	1	1	1			
rac	1/3	7	1	1/3	1/5	1/7	1/3	1		
oxy	1/3	3	1	1/5	1/7	1/9	1/5	1/7	1	
sel	1/7	1/5	1/5	1/3	1/9	1/9	1/7	1/7	1/3	1

Figure 16 : Carte des sols du département d'Oursi
(ref. annexe 8 pour la description des unités)

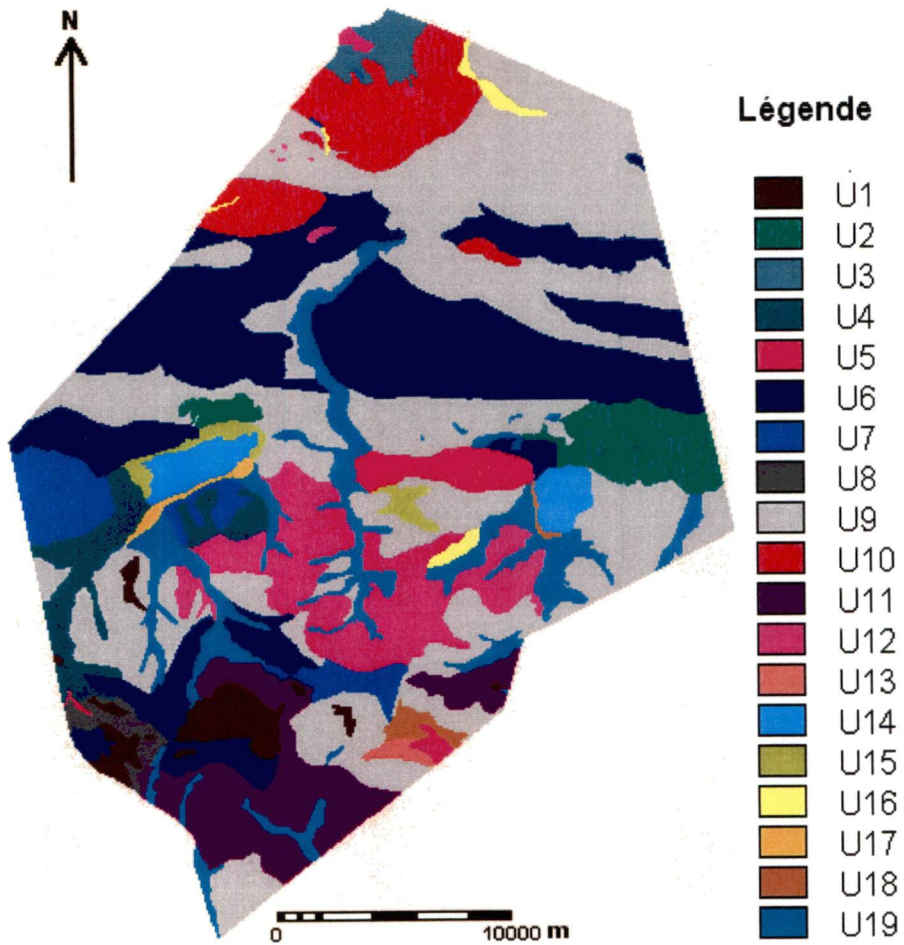
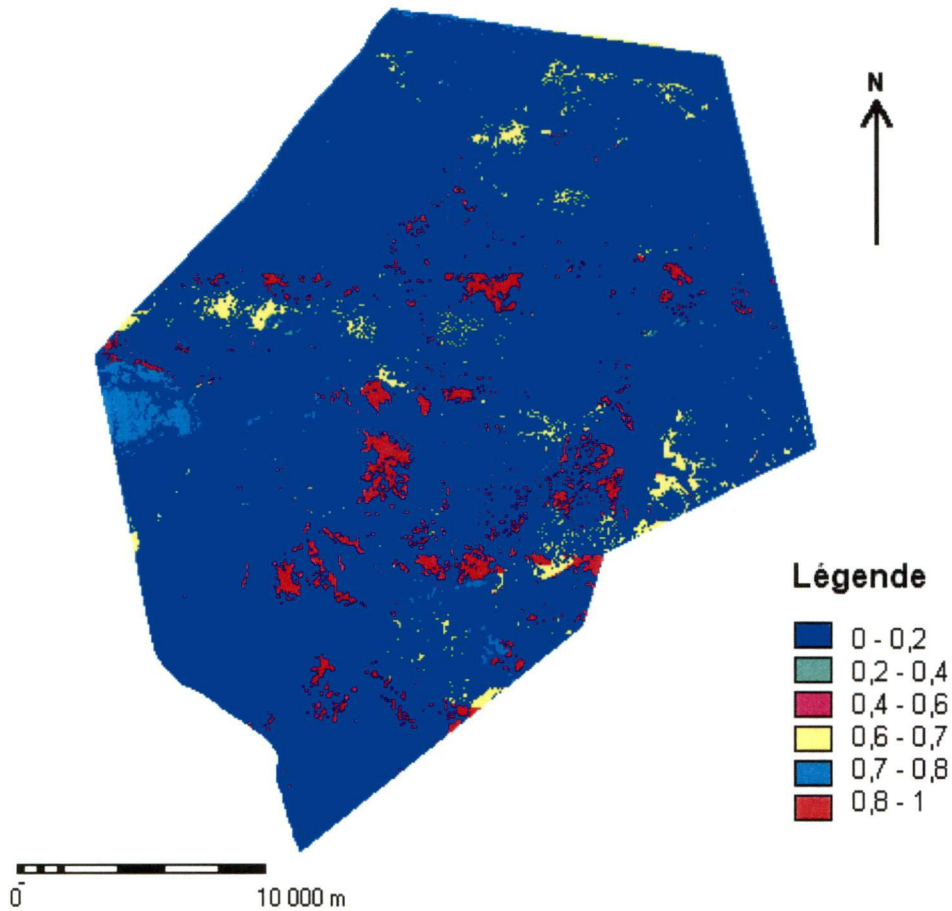


Figure 17 : Carte-image d'indice de surexploitation agricole



5.1.7 La santé, l'éducation et l'eau d'abreuvement

Les cartes-images représentées par la figure 18, indiquent respectivement l'état de la situation sanitaire, le niveau d'accès à l'éducation et à la disponibilité de l'eau pour le bétail. L'analyse de ces cartes montre la précarité de la situation. L'accès à la santé et à l'éducation fortement dépendant respectivement de la disponibilité en personnel et du taux de scolarisation, reste très limité. On note un maximum de 0,18 pour la santé et 0,21 pour l'éducation. Le taux de scolarisation (niveau I) calculé est de 21 % pour 1986 et 22 % en 1996 : en 11 ans le niveau de scolarisation n'a progressé que de 1 %.

L'analyse de la carte-image de disponibilité en eau pour l'abreuvement du bétail montre le privilège de la zone d'étude par rapport au reste de la province de l'Oudalan (annexe 9). En effet, la présence des mares d'Oursi et de Yomboli constitue un potentiel qu'il convient d'exploiter avec prudence. En effet, en année sèche, ces mares tarissent et deviennent alors des zones de pâture et de concentration extrême de bétail, ce qui conduit à la dégradation du milieu environnant. On remarque que le nord et le sud de la zone connaissent un indice de disponibilité en eau très faible.

Figure 18 : Cartes-images d'indices socioéconomiques

Figure 18 A

Zone de recherche : carte d'indice de santé
($0,18 \cdot$ indice d'accès aux points de santé)

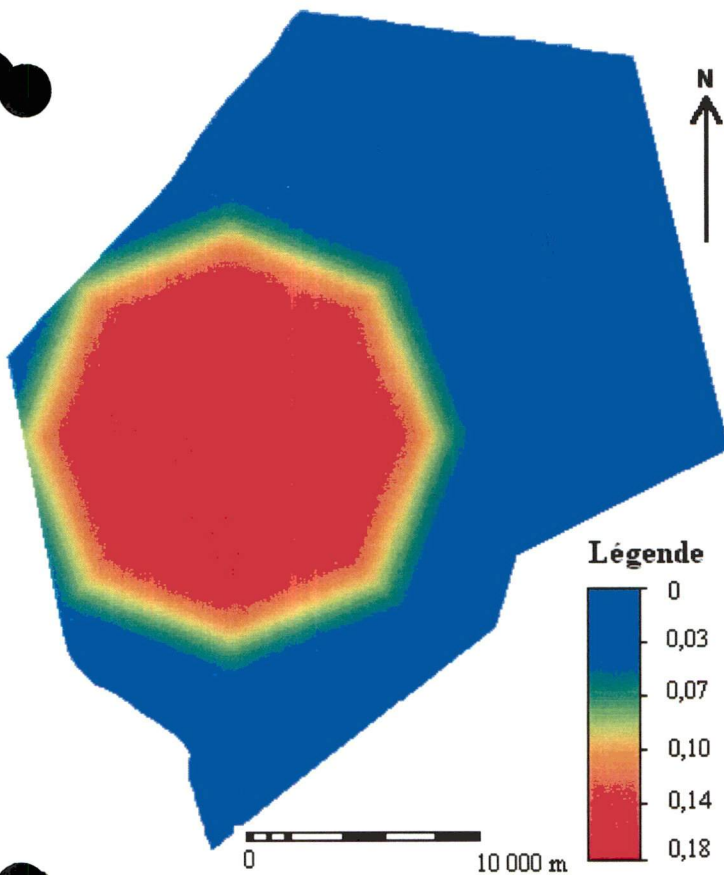


Figure 18 B

Zone de recherche :
Indice d'accès à l'éducation ($0,21 \cdot$ distance école)

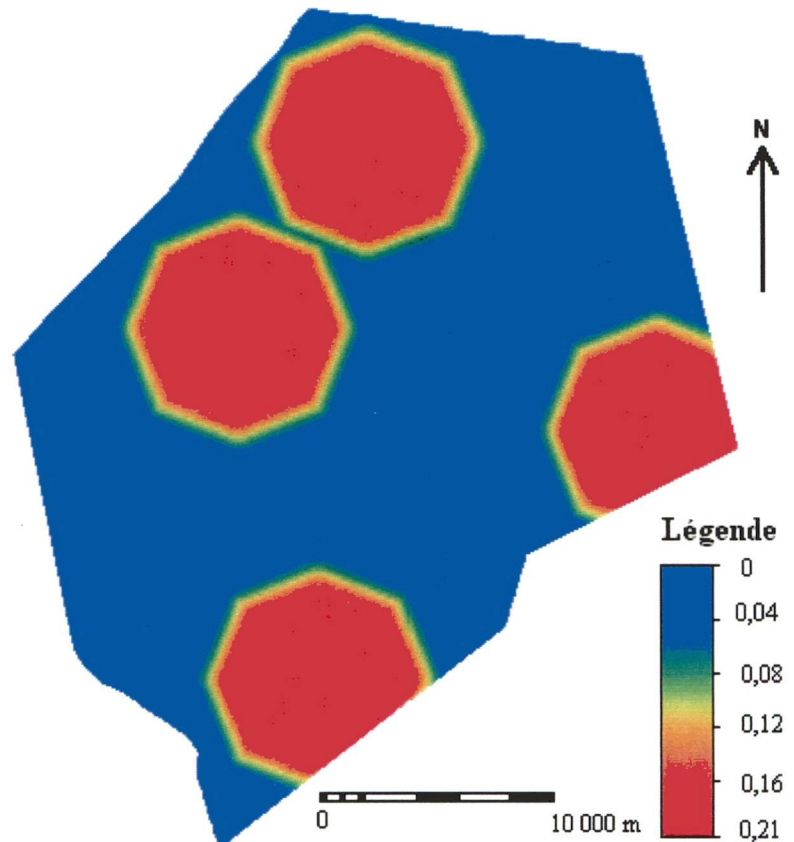
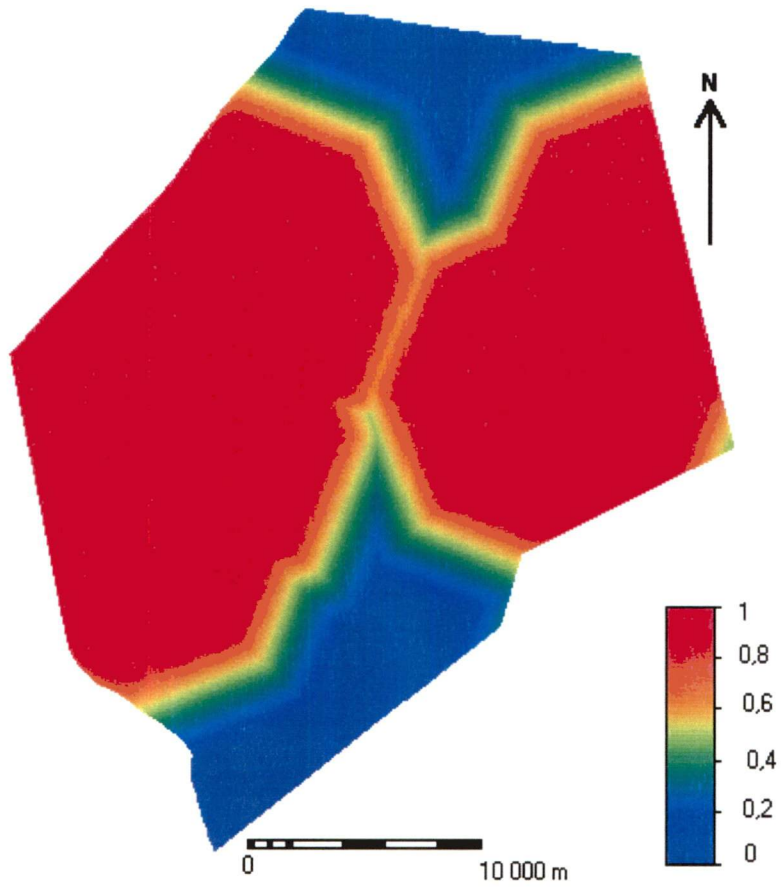


Figure 18 C

Carte d'indice d'accès à l'eau d'abreuvement



5.2 Validation et interprétation des résultats de la simulation

5.2.1 La biomasse primaire simulée

Le tableau 13 résume les résultats de simulation de la biomasse primaire selon les modèles de Wu standard et de Wu modifié.

Tableau 13 : Résultats de simulation de la biomasse herbacée (1996) : quantité et écart type (en kg.MS.ha⁻¹); erreur relative (en %)

Description des unités pastorales	UP	<i>in situ</i>		Modèle standard			Wu modifié		
		MS	Écart type	MS	Écart type	Erreur relative	MS	Écart type	Erreur relative
Dunes & Ensablements	Ab	975	230	1100	87	13	831	77	15
	Aa	1064	81	812	152	24	1087	121	2
	Ae	1480	150	1647	284	11	1579	216	7
Glacis	Ba	356	125	386	66	8	435	64	22
	Bb	380	50	363	103	4	397	98	4
	Bc	580	200	881	380	52	921	343	59
Zones gravillon.	Dc	220	43	394	111	79	429	101	95
	Db	356	63	365	65	3	386	63	8
Jachères	JC	950	51	1131	417	19	1087	380	14
Vallées / zones hydromorphes	Ma	2350	88	2536	86	8	2373	59	1
	McHb	1700	76	1834	285	8	1753	222	3

La figure 19 permet de mieux visualiser ces résultats pour l'interprétation et l'analyse statistique.

Il en ressort les principales observations suivantes :

- à l'échelle du département, la corrélation entre biomasse primaire *in situ* et celle calculée est forte pour les deux modèles (figures 20 & 21). Par ailleurs, la productivité annuelle des différentes UP au cours des 10 années de simulation suit la même tendance : élevée dans les zones hydromorphes et les dunes, faible pour les zones gravillonnaires et les glacis; d'où la pertinence des approches,

Figure 19 : Biomasse herbacée simulée selon les deux modèles

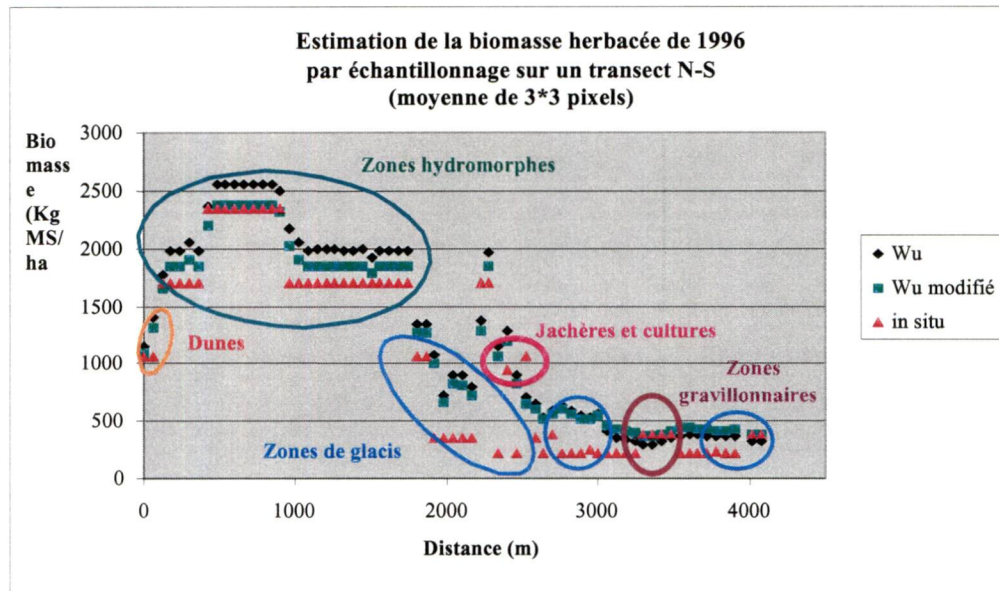


Figure 20 : Corrélation globale entre le modèle de Wu et les données *in situ*

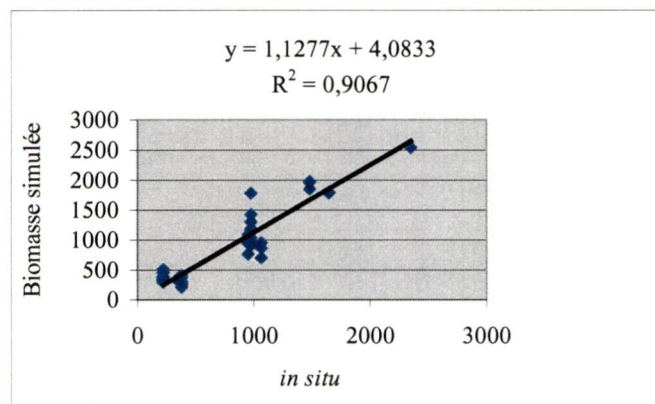
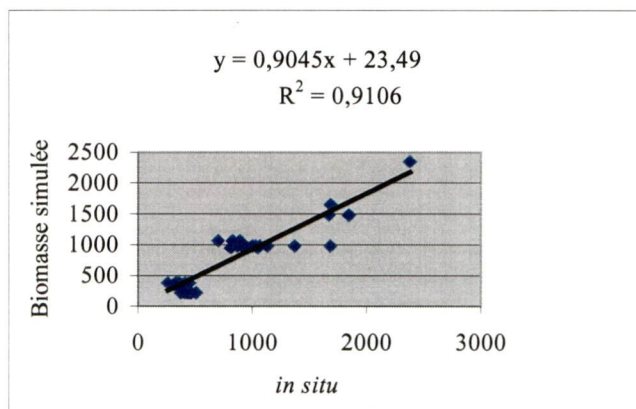


Figure 21 : Corrélation globale entre le modèle de Wu modifié et les données *in situ*



- à l'échelle des UP, les zones de très forte productivité (dépressions et zones hydromorphes, dunes et jachères) présentent les meilleurs résultats. L'efficacité du modèle modifié (tableau 14) y est remarquable : 4 fois supérieure à celle du modèle standard (RMS de 44 kg.MS.ha⁻¹ contre 200). Ces conclusions cadrent avec la réalité terrain. L'action anthropique y est beaucoup plus prononcée car elles sont très convoitées pour les cultures malgré les risques énormes de dégradation. La considération de l'indice agricole est donc bien justifiée;
- les deux modèles se comportent à peu près de la même manière au niveau des UP Bc et Dc : erreurs relatives respectives de 52 % et 79 % pour le modèle standard contre 59 % et 95 % pour le modèle modifié. Ces erreurs d'estimation semblent à notre avis liées au manque de précision du NDVI : effet du sol nu (50 % et 90 %) appuyée d'une physiographie particulièrement ondulée avec des affleurements rocheux de type quartzitique et cuirassé. On y observe en effet des valeurs de biomasse initiale (V1986) trop élevées (580 kg.MS.ha⁻¹ pour Dc);

Tableau 14 : Efficacité de prédiction de la biomasse

Zone	ERQM = erreur moyenne quadratique		efficacité de modifié/ standard	Comparaison des moyennes (Cote Z pour n >30)
	standard	modifié		
Globale	308	252	1,22	
Hydromorphe	200	44	4,55	49
Dune	472	572	0,83	-0,33
Gravillonnaire	258	251	1,03	0,092
Glacis	230	234	0,98	1,123

- dans les glacis et zones gravillonnaires, le modèle modifié est beaucoup moins efficace (1,03 et 0,98 respectivement). Ceci est renforcé par une cote Z de 0,092 pour les zones gravillonnaires qui impose le non rejet de l'hypothèse nulle, c'est-à-dire qu'il n'y aurait pas d'effet des paramètres socioéconomiques sur la productivité de ces zones. Ces zones inaptes à l'agriculture présentent en effet un indice de surexploitation agricole nul (zones non cultivées).

Cependant, même si les résultats observés indiquent le non rejet de l'hypothèse nulle, il faut souligner les limites des données socioéconomiques utilisées, notamment celles liées à la santé et à l'éducation. Des études plus poussées dans le temps et dans l'espace pourraient apporter une meilleure précision. Il s'agirait alors de définir des zones de recherche et de mettre en place des systèmes de collecte de séries de données plus fiables et plus détaillées. Cela permettrait sans doute une meilleure évaluation de la contribution des différents paramètres. Par exemple, la prise en compte de tous les niveaux d'éducation (I, II, III et adultes) selon l'approche des Nations Unies (UNDP, 1998) devrait améliorer les résultats. La disponibilité en eau pourrait aussi inclure les débits des forages et le temps d'exhaure.

D'ailleurs, les résultats de l'analyse de sensibilité de la biomasse aux paramètres socioéconomiques confirment ces hypothèses : la biomasse est sensible aux variations des paramètres socioéconomiques quand bien même cette sensibilité reste très faible.

En outre, l'indice de pluviométrie efficace utilisé est le même pour tout le département d'Oursi. Ceci pose le problème de la validité de la méthode d'estimation de l'indice d'humidité au niveau des zones à faible taux de couverture basale (2 à 15 %) pouvant résulter en une surestimation de ce paramètre.

D'une manière générale, l'observation de la variation de la biomasse sur les 10 années de la simulation montre des fluctuations relativement faibles et l'analyse de l'évolution des indicateurs montre une bonne concordance des résultats :

- lorsque la densité animale (H) augmente, l'indicateur de surpâturage, même en année excédentaire, reste tout aussi élevé : la compensation de l'effet cumulé de la sécheresse ne pourrait être effective qu'au bout de plusieurs années consécutives de pluviométrie dite normale, d'où la nécessité d'organiser et de maintenir la transhumance vers les zones plus productives, surtout en saison sèche;
- la variation de K reste très faible ($\Delta K < 1,4 \%$), ce qui semble logique : le temps de simulation est court pour vraiment déceler les variations au niveau départemental. Par exemple, la comparaison des résultats de la classification de l'image SPOT (1986) avec la carte de biomasse établie sur la base de photographies aériennes de 1956 (Toutain, 1976) montre une évolution des UP tant sur le plan spatial que quantitatif sur 30 années. Une plus longue période de simulation pourrait donc faire apparaître des variations plus perceptibles pour cet indice. Dans tous les cas, comme une forte variation serait synonyme de dégradation irréversible étant donné la tendance négative, il est plutôt encourageant d'observer de tels résultats!
- enfin, une analyse des écarts enregistrés (variabilité spatiale) par UP montre qu'en dehors de Dc et Bc, les productions simulées sont contenues dans les limites des valeurs mesurées *in*

situ. Pour les 9 UP, l'erreur relative moyenne est, respectivement, de 11 et 8 % pour le modèle standard et le modifié.

5.2.2 Sensibilité de la biomasse aux paramètres socioéconomiques (I_{SAG} , I_{AE} , I_{DE})

La sensibilité (τ) de la biomasse ($V(t)$) par rapport à un paramètre spécifique (x) peut être définie comme le rapport entre la variation relative de la biomasse ($V(t)$) sur la variation relative du paramètre (x) :

$$\tau = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\frac{\Delta x}{x}} = \frac{\Delta V}{\Delta x} \left(\frac{x}{V} \right) \quad \text{équation 5.8}$$

Pour des variations infinitésimales, $(\Delta V/\Delta x)$ peut être assimilée à la dérivée partielle $\frac{\partial V(t, x)}{\partial x}$

L'expression reliant la biomasse à l'ensemble des paramètres socioéconomiques peut être déduite des équations 4.1, 4.2, 4.3, 4.8, 4.16, 4.19 et 4.20 :

$$V(t, I_{AS}, I_{AE}, I_{DE}) = V_{\max} * K(t-1) * R_c(t) \left[1 + \frac{b * (I_{AS} * I_{AE} * I_{DE} * R(t) * C(t)) - \xi(t)}{1 + I_{AS} * I_{AE} * I_{DE} * R(t) + \xi(t)} \right] \quad \text{équation 5.9}$$

$$\text{avec } \xi(t) = 1 - C(t) * \{S + s * (\max(0, 0_{G(t)} + \max(0, I_{SAG}))\} \quad \text{équation 5.10}$$

$\xi(t)$ = constante correspondant à chaque période t .

La sensibilité de V par rapport à l'indice de santé I_{SA} se déduit de l'équation 5.9 telle que :

$$\tau_{AS}(t) = \frac{\partial V(t, I_{AS}, I_{AE}, I_{DE})}{\partial I_{AS}} \cdot \frac{I_{AS}}{V} \quad \text{équation 5.11}$$

ce qui donne, après développement :

$$\tau_{AS}(t) = \frac{\mu_{AS}(t) + \mu_{AS}(t) * \xi(t) + Y_{AS}(t) * \varpi_{AS}(t)}{[1 + \varpi_{AS}(t) * I_{AS} + \xi(t)]^2} \quad \text{équation 5.12}$$

$$\text{avec } \mu_{AS}(t) = b * V_{\max} * R_c(t) * K_{(t-1)} * R(t) * C(t) * I_{AE} * I_{DE} \quad \text{équation 5.13}$$

$$Y_{AS}(t) = V_{\max} * R_c(t) * K_{(t-1)} * \xi(t) \quad \text{équation 5.14}$$

$$\varpi_{AS}(t) = R(t) * C(t) * I_{AE} * I_{DE} \quad \text{équation 5.15}$$

Les sensibilités de la biomasse par rapport à l'accès à l'éducation et par rapport à la disponibilité de l'eau s'obtiennent par le même procédé :

$$\tau_{AE}(t) = \frac{\mu_{AE}(t) + \mu_{AE}(t) * \xi(t) + Y_{AE}(t) * \varpi_{AE}(t)}{[1 + \varpi_{AE}(t) * I_{AE} + \xi(t)]^2} \quad \text{équation 5.16}$$

$$\tau_{DE}(t) = \frac{\mu_{DE}(t) + \mu_{DE}(t) * \xi(t) + Y_{DE}(t) * \varpi_{DE}(t)}{[1 + \varpi_{DE}(t) * I_{DE} + \xi(t)]^2} \quad \text{équation 5.17}$$

$$\text{avec } \mu_{AE}(t) = b * V_{\max} * R_c(t) * K_{(t-1)} * R(t) * C(t) * I_{AS} * I_{DE} \quad \text{équation 5.18}$$

$$\varpi_{AE}(t) = R_c(t) * I_{AS} * I_{DE} \quad \text{équation 5.19}$$

$$\mu_{DE}(t) = b * V_{\max} * R_c(t) * K_{(t-1)} * R(t) * C(t) * I_{AS} * I_{AE} \quad \text{équation 5.20}$$

$$\varpi_{DE}(t) = R_c(t) * I_{AS} * I_{AE} \quad \text{équation 5.21}$$

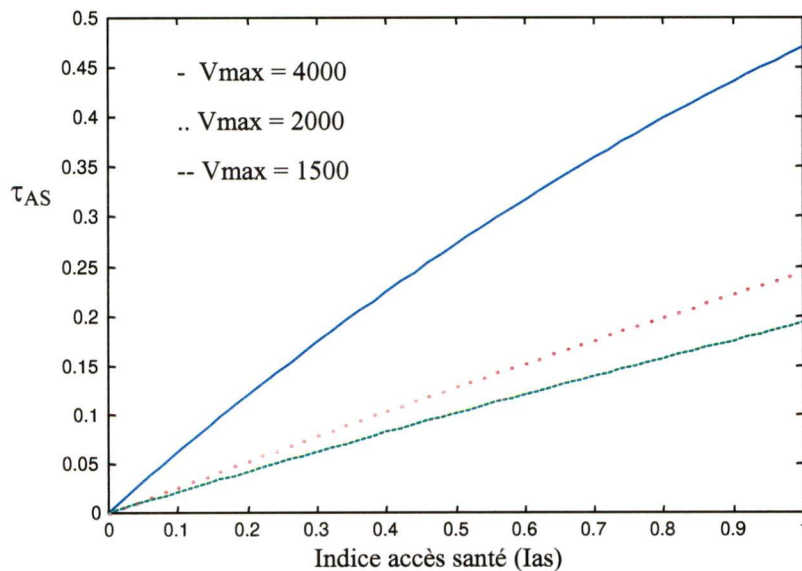
τ_{AE} = sensibilité de la biomasse par rapport à l'accès l'éducation,

τ_{DE} = sensibilité de la biomasse par rapport à la disponibilité de l'eau.

L'évaluation de la sensibilité de la biomasse primaire par rapport aux trois paramètres socioéconomiques (τ_{AS} , τ_{AE} , τ_{DE}) montre que ceux-ci ont le même impact. Ce qui est dû principalement au fait que les 3 paramètres socioéconomiques considérés sont intégrés avec le même poids comme en témoigne l'équation 4.19.

La figure 22 montre les résultats d'analyse de sensibilité par rapport à l'accès à la santé réalisée pour différentes UP présentant trois niveaux de potentiel de biomasse. D'une manière générale, la sensibilité reste relativement faible. En effet, pour l'indice de santé de référence qui est de 0,18, la sensibilité correspondante se situe autour de 0,10, c'est-à-dire qu'une augmentation de l'indice de santé de 1 % autour de la valeur de référence 0,18 provoquera une augmentation de la biomasse de 0,1 %. Plus l'indice d'accès à la santé est élevé, plus son impact sur la biomasse est élevé. Cela est traduit par la croissance des courbes à la figure 22. Les zones présentant le plus haut potentiel de biomasse primaire sont les plus sensibles à I_{AS} ($V_{max} = 4\ 000\ \text{kg.MS.ha}^{-1}$). L'analyse effectuée ici pour l'indice d'accès à la santé est valable aussi pour les indices d'accès à l'éducation et à l'eau.

Figure 22 : Sensibilité de la biomasse en fonction de l'indice d'accès à la santé

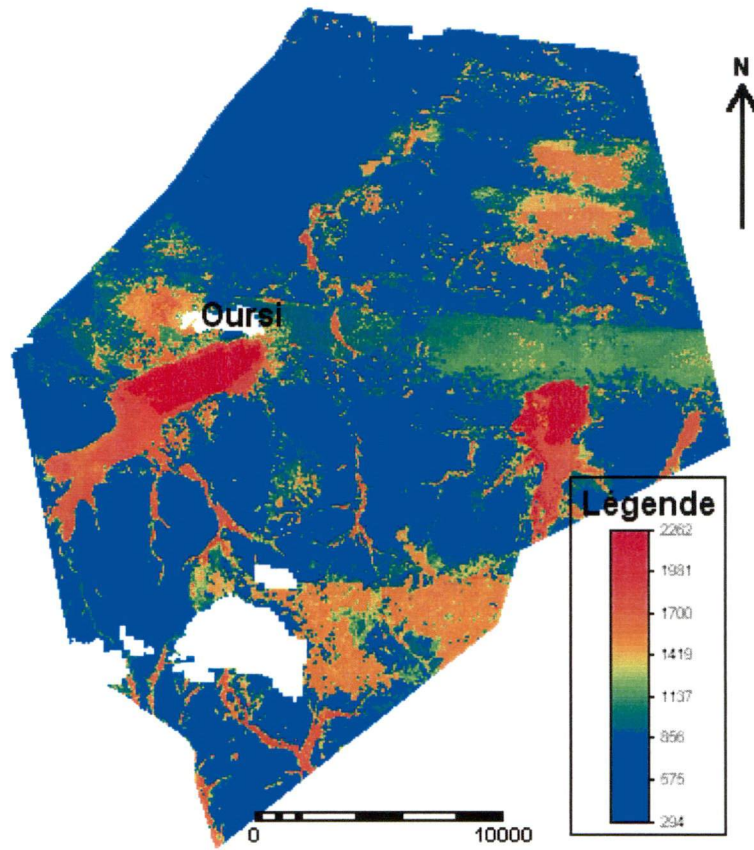


5.3 Conclusion partielle

La validation des résultats s'est basée sur les données de l'approche traditionnelle (tableau 11), ce qui ne permet pas d'évaluer la variation spatiale à l'échelle du pixel. Idéalement, elle devrait se baser sur des résultats de corrélation entre données de télédétection (NDVI) et la biomasse. Cela aurait permis sans doute une représentation spatiale plus exacte de la biomasse *in situ* (V_{10}). Néanmoins, l'agrégation des résultats par UP sur un transect (figure 19) représentant les différentes UP constitue un compromis acceptable et les variations spatiales observées sont réalistes. L'observation de ces résultats confirme les hypothèses de recherche :

- amélioration des prédictions de biomasse lorsque des paramètres socioéconomiques sont intégrés au modèle. Les résultats de l'étude de sensibilité de la biomasse primaire à ces paramètres corroborent la démarche. En effet, ils démontrent que la sensibilité de la biomasse aux variations de ces paramètres quoique relativement faible, reste effective et donc considérable. L'augmentation des indices sociaux contribue à augmenter la biomasse. Cependant, la moindre réduction des indices sociaux résulte en un impact négatif sur la biomasse;
- à partir de la moyenne interannuelle (figure 23) de la production primaire simulée, formulation de scénarios d'aménagement. Ceux-ci présentent l'intérêt de tenir compte des différentes contraintes et offrent une base de flexibilité pour des stratégies de développement durable et d'organisation de circuits de transhumance.

Figure 23 : Production moyenne de biomasse herbacée (1986-1996) en kg.MS.ha⁻¹



CHAPITRE 6 PRODUCTIVITÉ SECONDAIRE DU MILIEU ET SCENARIOS DE GESTION

La productivité secondaire du milieu exprime sa capacité à permettre à l'UBT de produire du lait ou de la viande sur une unité de surface donnée, et se réfère à la notion de capacité de charge. Comme déjà mentionné aux chapitres 3 & 4, sa détermination fait intervenir la productivité primaire du milieu (quantité de biomasse végétale herbacée et ligneuse) en relation avec sa qualité, les besoins alimentaires quantitatifs et qualitatifs des animaux et la disponibilité en eau. À partir des résultats de la simulation et des analyses bromatologiques, ce chapitre présente les scénarios d'exploitation de l'espace pastoral et les stratégies de gestion optimale.

6.1 Analyse du potentiel de production secondaire

D'un point de vue quantitatif, la production de matière sèche de la zone semble répondre aux besoins de la population animale. En effet, la quantité produite est suffisante pour maintenir la charge actuelle de la zone d'étude telle que définie au tableau 9. Ainsi, en considérant uniquement la quantité moyenne de fourrage produit (tableau 15) en relation avec la composition des troupeaux de la zone d'étude (28 % de mâles et de 41,5 % de femelles reproductives, soit 1960 vaches), une production d'environ 1230 tonnes de lait serait envisageable en 7 mois de lactation, à raison de 3 litres de lait / jr / vache. Par ailleurs, la zone assurerait l'entretien d'environ 7000 UBT en plus de pouvoir en accueillir autant (7500 UBT pendant la période de production laitière, 5500 UBT le restant de l'année) !

Malheureusement, pour l'entretien et la production secondaire (lait ou viande), la qualité du fourrage (teneur en UF et MAD) ne satisfait pas les besoins et reste très variable dans le temps et dans l'espace. Cela explique entre autres, l'utilité de la géomatique pour en faire le suivi. Cette qualité constitue le véritable goulot d'étranglement autour duquel les stratégies de gestion doivent être élaborées. Dès la fin de la période végétative, la plupart des espèces herbacées (annuelles notamment) deviennent nulles en MAD et leur niveau énergétique baisse considérablement. En

saison sèche, elles perdent toute leur valeur nutritive et le bétail ne doit sa survie qu'aux ligneux fourragers.

Le tableau 16 révèle les résultats des analyses bromatologiques. Pour la biomasse herbacée, la valeur fourragère correspond à la période optimale de production primaire, c'est-à-dire la période végétative. Pour la majorité des UP, le niveau énergétique de la biomasse est satisfaisant aussi bien chez les herbacées que chez les ligneux. Il est alors envisageable de viser une production de lait ou de viande conséquente :

- une augmentation de la période de lactation : 7 mois (de juillet à janvier) contre les 5 mois présentement observés et une production journalière de 3 à 4 litres contre 1 à 1,5 litre;
- un GMQ (gain moyen quotidien) de 500 g pendant 6 mois (août à janvier) afin d'offrir une meilleure qualité pour 50 % des mâles pour l'exportation (sur pied ou viande).

Tableau 15: Capacité de charge moyenne de la zone d'étude (en UBT.ha⁻¹.an⁻¹)

Unité pastorale	Biomasse moyenne (kg.MS.ha ⁻¹)			Capacité de charge
	herbacée exploitable	ligneuse	totale	
Aa	854	162	1016	0,45
Ab	634	130	764	0,33
Ae	962	162	1124	0,49
Ba	231	47	278	0,12
Bc	247	70	317	0,14
Bc	377	70	447	0,20
Db	231	150	381	0,17
Dc	143	130	273	0,12
JC	618	170	788	0,35
Ma	1528	0	1528	0,67
McHb	1105	450	1555	0,68

Tableau 16 : Valeur fourragère de la production primaire en 1996

Unité pastorale	Biomasse herbacée		Biomasse ligneuse	
	UF	MAD	UF	MAD
Aa	0,43	34,5	0,84	10,89
Ab	0,34	20,5	0,72	11,17
Ae	0,94	11,3	0,93	10,94
Ba	0,33	25,2	0,84	11,23
Bc	0,33	11,3	0,72	9,39
Bc	0,74	11,3	0,70	8,93
Db	1,14	34,5	0,68	5,8
Dc	0,28	26,9	0,75	4
JC	0,38	31,6	0,78	12,96
Ma	0,60	23,4	0	0
McHb	0,50	32,2	0,80	11,78

6.2 Les circuits de transhumance

La carte de la figure 24 définit les zones pouvant être utilisées pour la définition de circuits de transhumance ou de zones potentielles de passage des animaux dans un souci d'exploitation durable. Elle résulte de la combinaison des quatre critères principaux en la matière : la productivité primaire, la disponibilité en eau (annexe 9), le niveau de surpâturage (annexe 10) et le niveau de surexploitation agricole (figure 17).

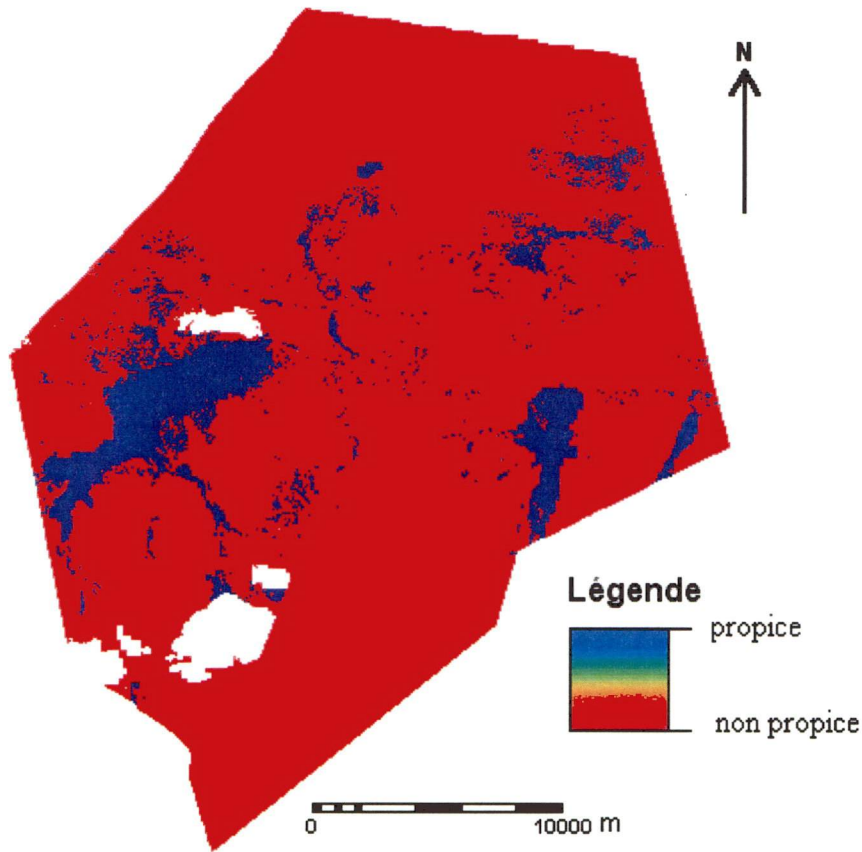
La charge optimale de $0,2 \text{ UBT} \cdot \text{ha}^{-1}$ implique une production primaire de $720 \text{ kg} \cdot \text{MS} \cdot \text{ha}^{-1}$. En admettant qu'en saison sèche, un minimum de 20 % de la ration alimentaire soit $145 \text{ kg} \cdot \text{MS} \cdot \text{ha}^{-1}$, doit être fourni par l'apport des ligneux pour satisfaire les besoins d'entretien et de déplacement de l'UBT, la biomasse herbacée limite se réduit à $575 \text{ kg} \cdot \text{MS} \cdot \text{ha}^{-1}$. La transhumance est consommatrice d'eau et de pâturage et les besoins de déplacement s'accroissent. Par conséquent, l' I_{DE} optimal est celui qui assurerait non seulement le maintien de l'UBT, mais en plus qui

éviterait la dégradation liée à la concentration du bétail. Nous avons fixé cette limite à 0,6. Au-dessous de cette valeur, nous estimons que les risques de concentration sont élevés et par conséquent, la durabilité de l'activité pastorale est compromise. En d'autres termes, le rayon d'action des points d'eau ne devraient pas dépasser les 7 km, l'idéal de 3 km étant coûteux à réaliser. En considérant la charge optimale ($\leq 0,2$ UBT.ha⁻¹) et la charge de référence, l'indice de surpâturage maximal calculé correspond à 0,33. La surexploitation agricole doit être nulle pour éviter d'accentuer la dégradation du milieu. Les conditions se résument comme suit :

- production primaire ≥ 575 kg.MS.ha⁻¹;
- disponibilité en eau $\geq 0,6$;
- surpâturage $\leq 0,33$;
- surexploitation agricole = 0.

La figure 24 résulte de l'application de ces quatre conditions à la zone d'étude. On observe que seulement environ 10 % de la zone d'étude répond à ces conditions. Comme on pouvait s'y attendre, ces zones sont à la fois liées aux dunes et abords des cours d'eau qui sont soumis à de faibles actions anthropiques. La partie sud et l'extrême nord de la zone n'offrent aucune possibilité. La présence de glacis et de zones gravillonnaires dégradés (taux de recouvrement basal inférieur à 20 %) explique la situation qui dénote par ailleurs de la fragilité du milieu. En d'autres termes, tout séjour des animaux dans la zone doit être réglementé pour éviter les surcharges.

Figure 24 : Carte-image des zones potentielles pour la transhumance



6.3 Les scénarios de gestion et la productivité secondaire

Les deux scénarios d'exploitation du milieu pastoral explorent l'année en 3 périodes. Ils ont pour soucis de tenir compte de l'état des UP et de la variabilité spatiotemporelle de la qualité de la biomasse herbacée et ligneuse. La première période considérée est celle de la saison pluvieuse. Sa durée est de 4 mois : de juillet à octobre. Elle correspond à la période d'abondance de la végétation herbacée pendant laquelle on peut considérer que la qualité de la biomasse (MAD et UF) est satisfaisante. La seconde période est constituée par le début de la saison sèche qui est de 2 mois (de novembre à décembre). Elle représente en quelque sorte le pont de transition entre l'abondance et la soudure. À cette période, la teneur en MAD est presque nulle et la valeur énergétique réduite de moitié. Enfin, la dernière période qui est la plus longue et la plus difficile à gérer est sans conteste la période de saison sèche (6 mois : de janvier à juin). Là, non seulement la teneur en MAD des herbacées est nulle, mais aussi leur valeur énergétique est réduite

pratiquement à zéro, ou au meilleur des cas, au tiers. Durant cette période, seuls les ligneux peuvent fournir des apports nutritifs appréciables pour l'entretien de l'UBT.

Les figures 25 & 26 schématisent les variations spatiales, quantitatives et qualitatives de la biomasse. Celles-ci constituent la base de la mise en œuvre des scénarios définis au § 4.5 : utilisation rationnelle des UP selon les saisons et la capacité de charge pour le scénario 1 et mise en défens des zones fortement dégradées (glacis et zones gravillonnaires) pour le scénario 2. Ainsi, le deuxième scénario vise davantage à favoriser la régénération de la végétation. Il s'agirait de mettre les zones dégradées au repos pendant au moins 3 années consécutives avec cependant des actions de scarification pour permettre l'infiltration de l'eau dans le sol. Les UP des zones hydromorphes, notamment les prairies aquatiques, sont exploitables en toute période. Il est toutefois important d'éviter les surcharges. C'est pourquoi un système de rotation est préconisé pour assurer un succès dans la gestion du milieu : pâture dans les dunes en saison pluvieuse (Aa, Ab et Ae) et dans les zones hydromorphes (Ma, McHb) en saison sèche (repousses) avec complément des ligneux.

Dans l'un ou l'autre scénario, il reste bien entendu que des apports en compléments alimentaires énergétiques, azotés et minéraux (son de blé, graines ou tourteaux de coton, cure salée ou pierres à lécher) sont nécessaires notamment en saison sèche.

Figure 25 : Stratégie d'exploitation des UP selon les saisons en %

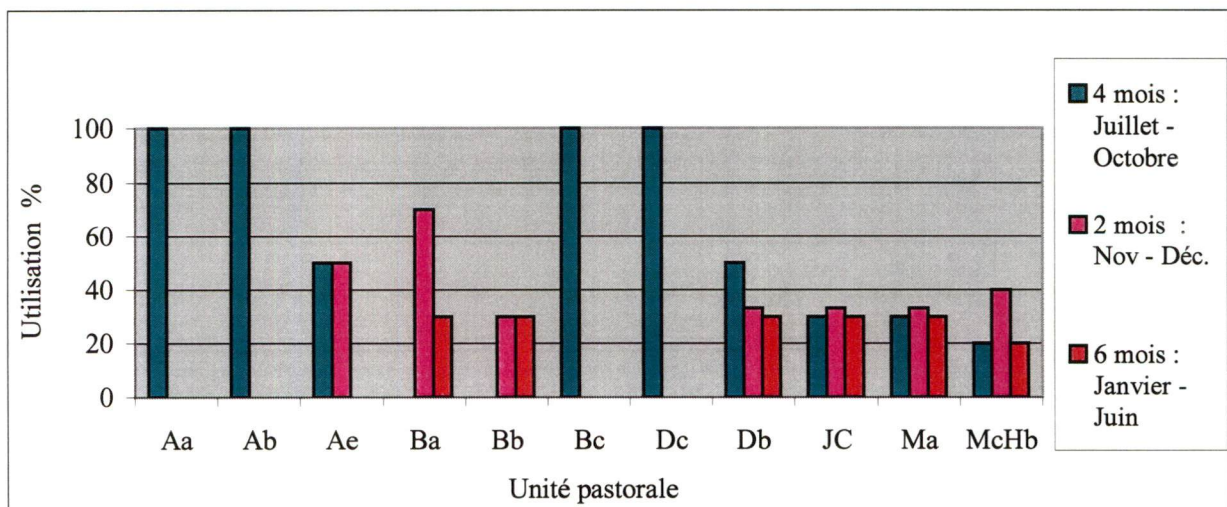
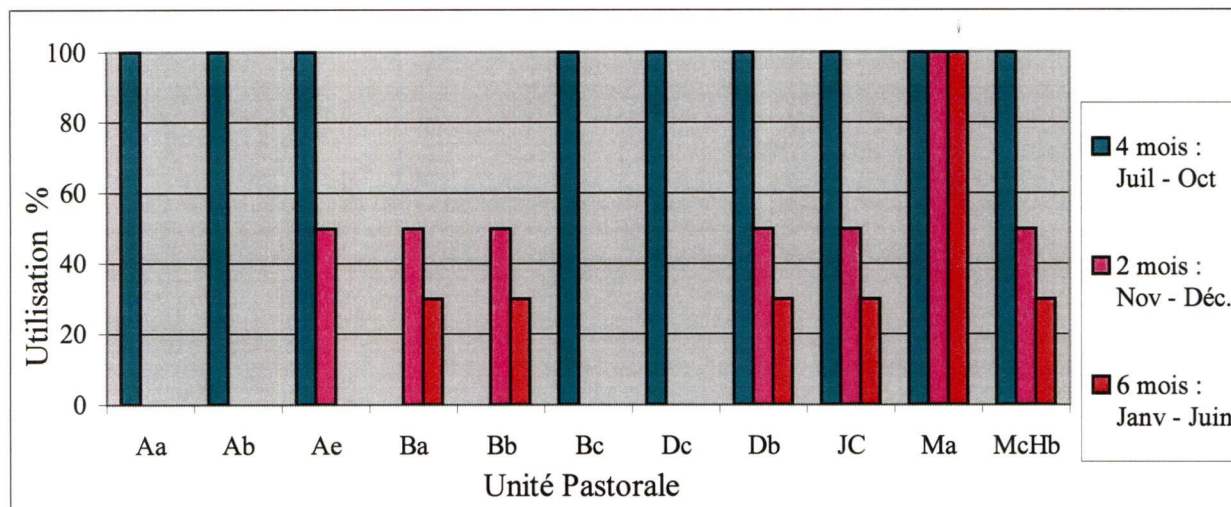


Figure 26 : Qualité de la biomasse : teneur en UF selon les saisons

6.3.1 Le scénario I

D'une manière générale, ce scénario aboutit à des résultats satisfaisants pour la période 1. Les tableaux 17, 18 et 19 le confirment. En effet, la quantité et la qualité de la biomasse à cette période permettent de satisfaire les besoins de production. On note des surplus d'environ 4000 UBT quel que soit le type de production envisagée. Ce qui signifie que des stocks de foin pourraient être constitués afin de fournir des compléments en saison sèche. Par contre, des déficits importants sont enregistrés dès la période 2 (5 à 7000 UBT). Cela correspond à la réalité terrain et justifie la transhumance. Néanmoins, le déficit de la période 2 peut être compensé par les réserves de foin préconisées. Le départ pour la transhumance pourrait alors être retardé de 1 à 2 mois soit en décembre ou seulement en janvier au lieu de novembre.

6.3.2 Le scénario II

Le retrait de toutes les zones dégradées de la pâture réduit la zone exploitable de près de moitié. Cela semble irréaliste. Cependant, le niveau de dégradation de la zone impose de considérer une telle stratégie. On note d'ailleurs, que ce scénario permet aussi de produire du lait en période 1. Cependant la production devient beaucoup plus hypothétique en période 2. Un déficit de près de 8000 UBT est alors enregistré. Ce qui signifie que presque toute la charge animale doit être évacuée! Il en est de même pour la production de viande pour laquelle on note déjà un déficit de

près de 2000 UBT dès la période 1. Ceci commande de réduire le nombre de têtes de bétail à emboucher et de pratiquer un délestage précoce. En d'autres termes, la zone pourrait servir de naissance et la finition se ferait dans d'autres zones plus productives.

Tableau 17 : Scénarios de gestion et charge supportable en UBT

Scénario	Période 1	Période 2	Période 3
I	13 495	4 000	2 093
II	7 726	1 805	973

Tableau 18 : Scénarios de gestion et production de lait : déficit en UBT

Scénario	Période 1	Période 2	Période 3
I	+ 3 778	- 5 713	- 7 045
II	- 1 990	- 7 045	- 8 165

Tableau 19 : Scénarios de gestion et production de viande : déficit en UBT

Scénario	Période 1	Période 2	Période 3
I	+ 4 041	- 5 450	- 6 007
II	- 1 727	- 7 648	- 8 050

La figure 27 résume les stratégies d'exploitation du milieu :

- la petite transhumance permet au bétail d'exploiter les cures salées de la zone tout en évitant de grands déplacements pouvant affecter le niveau de la production (lait ou viande);

- la grande transhumance permet d'éviter les grandes surcharges en période de soudure où l'alimentation rare peut causer des affaiblissements et une baisse de rendement difficile à compenser.

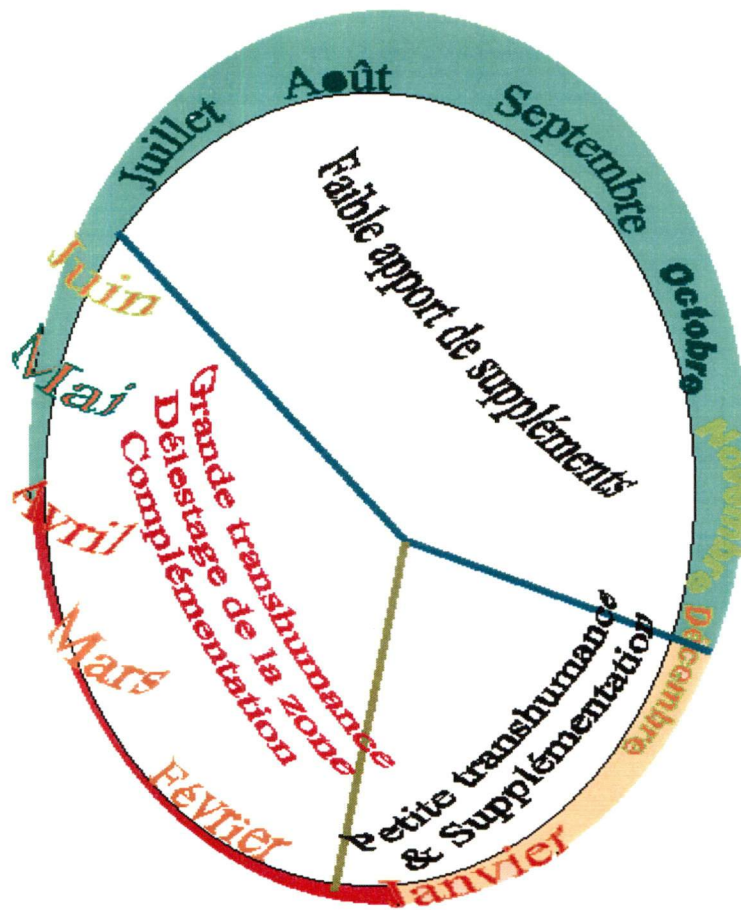
La production secondaire du milieu pastoral (tableau 20) qui résulte de la mise en œuvre des scénarios développés montre le niveau de productivité de la zone d'étude. L'interprétation de ces résultats permet de tirer les principales conclusions suivantes :

- il est possible de produire de la viande et du lait dans le milieu sahélien si des compléments sont apportés en début de saison sèche et au cours de la saison sèche. En saison pluvieuse, la qualité de la biomasse est suffisante pour couvrir les besoins azotés et énergétiques de l'UBT;
- la transhumance est un mode de gestion et d'exploitation du milieu pastoral sahélien qui est incontournable. La charge actuelle du bétail ne peut être maintenue sans elle. La période de départ des animaux vers des zones plus productives est définie par le type de production envisagée : pour le lait, il est possible de la retarder jusqu'à la fin de la période 2. Par contre, la production de viande exige un départ beaucoup plus précoce;
- l'importance du déficit pour les périodes II & III de l'année varie selon le type de production. Pour la période II, l'option «production de viande» montre un déficit plus important comparativement au déficit correspondant à l'option «production laitière» pour la même période et ce, malgré des niveaux plus importants en besoins en UF et MAD pour la production de viande. Le nombre plus élevé de reproductrices par rapport aux animaux d'embouche expliquent ces différences : 1960 reproductrices contre 920.

Tableau 20 : Stratégie de production secondaire et importance de la transhumance

	Litres de lait	kg de viande	UBT en transhumance		Début de la transhumance
			(lait)	(viande)	
Scénario I	823 200	82 800	5 713	5 450	Décembre/Janvier
Scénario II	823 200	82 800	1 990	1 989	Septembre

Figure 27 : Schéma de mise en œuvre des stratégies de gestion



7.1 Conclusions générales

La présente recherche visait en premier lieu la mise au point d'une architecture d'intégration de données socio-bio-géographiques et de données satellitales dans un Système d'Information Géographique (SIG) en vue de favoriser l'aide à la prise de décisions dans la gestion du milieu pastoral sahélien. D'une part, l'étude des paramètres de productivité pastorale a permis d'évaluer leur pertinence selon les niveaux de durabilité du milieu : niveau primaire, niveau secondaire et niveau du producteur. D'autre part, la disponibilité et l'accès des données ont été analysés pour servir de base pour le choix de l'approche de modélisation.

L'analyse et l'adaptation du modèle de Wu et *al.* (1996) au milieu pastoral Sahélien ont permis de prendre en compte la variabilité spatiotemporelle des différents paramètres de productivité du milieu sahélien, notamment les aspects socioéconomiques qui interfèrent dans la définition de l'état du milieu. En effet, les analyses de sensibilité ont montré que les variations des paramètres socioéconomiques entraînent des variations de la biomasse primaire. Ceci a permis de vérifier une de nos hypothèses de recherche et de corroborer notre méthodologie. Les résultats satisfaisants du modèle modifié constituent alors une base d'orientation pour des recherches futures. Par exemple, le niveau de précision des résultats reste fondamentalement lié à la qualité des données d'entrée; ce qui interpelle à la constitution de bases de données plus fiables et plus détaillées pour le milieu sahélien.

Les deux paramètres fondamentaux du développement pastoral sahélien ont été quantifiés et analysés : la 'production primaire' et la 'production secondaire'. À partir de ces éléments, des scénarios d'exploitation et de production du milieu pastoral ont été préconisés sur la base de la composition fourragère des pâturages, de la disponibilité de l'eau et de l'accessibilité des

infrastructures socioéconomiques. Ainsi, le déclin de la qualité du fourrage en saison sèche montre qu'il n'y a pas de solutions miracles pour aménager l'espace pastoral sahélien. En effet, les productions doivent être alternées et appuyées d'une supplémentation alimentaire si l'on veut maintenir un niveau de durabilité non compromise. De plus, l'exploitation de cet espace doit prendre en compte la variabilité de la qualité et de la quantité du fourrage. Aussi, la transhumance doit-elle être pratiquée de manière à assurer un délestage périodique de la zone pendant les périodes de haute production afin de protéger le milieu contre une dégradation irréversible. Bien que dans l'immédiat, le scénario II demande un départ précoce pour la transhumance et concerne une grande partie des animaux de la zone, il semble le meilleur moyen de lutter contre la dégradation du milieu. La mise en défens reste l'un des moyens les plus appropriés pour ce faire.

Nous avons pu démontrer les limites de production de la zone de recherche. Une des conclusions fondamentales est la vocation naturelle de la zone qui est le naissage. En effet, la finition des animaux ne pourrait être préconisée dans la zone compte tenu de la variabilité de la disponibilité de la biomasse (quantité et qualité).

7.2 Originalité de la recherche

Trois points fondamentaux forment l'originalité de cette recherche :

- l'application d'un modèle de simulation en zone sahélienne à partir de données simples et accessibles. En effet, les modèles existants impliquent des mesures de données très détaillées et spécifiques limitant alors leur utilisation par les aménagistes de terrain;
- le développement d'une approche pouvant servir de soupape au système de gestion de l'espace pastoral sahélien. En effet, la capacité de prévision offerte tient compte de la charge animale pour évaluer l'état du milieu et contribue à minimiser les coûts d'acquisition des données. Pour les pays sahéliens où les données de télédétection sont difficilement accessibles (disponibilité, coûts d'acquisition et de traitement), ce type d'approche permet de prédire la production primaire en utilisant une base de données collectées de manière fiable

dans le temps (par exemple tous les 5 ans), ce qui offre une aide très appréciable pour la prise de décision en matière de conception de politiques de développement soutenu et durable;

- la définition de critères de détermination des zones et des circuits de transhumance pour l'accès à l'eau et aux pâturages dans un cadre de durabilité. Ces critères tiennent compte de la fragilité du milieu et non des habitudes généralement observées.

De plus, la présente recherche a mis en exergue la vocation de la zone d'étude à savoir une zone de naisance pouvant servir de base pour le développement de l'élevage au Burkina Faso.

7.3 Recommandations

Plusieurs axes de recherche se dégagent des conclusions de la présente recherche. Tout d'abord, la méthodologie développée ici s'est limitée à seulement quatre paramètres socioéconomiques. Certains d'entre eux ont été spatialisés à travers des approches de généralisation qui peuvent être source d'erreurs plus ou moins importantes. De plus, les données utilisées restent assez peu détaillées. Une investigation plus approfondie des composantes socioéconomiques du milieu sahélien devrait permettre de meilleurs résultats. La durabilité de l'environnement et la survie aussi bien de l'homme que de l'animal en dépendent.

En outre, comme nous l'avons montré dans la problématique, l'inaccessibilité et la non disponibilité de données de télédétection sont deux caractéristiques majeures de la zone sahélienne. La collecte des données sur une base quinquennale devrait permettre de palier à ces insuffisances à travers la mise en œuvre de la méthodologie développée dans la présente recherche. Ceci minimiserait les coûts.

La zone de recherche devrait servir de zone de naisance et de production laitière. La production de viande ne saurait être réalisée à grande échelle.

Enfin, pour la mise en place des points d'abreuvement du bétail, la valeur du rayon maximal généralement admis de 12,5 km doit être revue afin d'assurer une durabilité dans la gestion des ressources naturelles en milieu sahélien. Les résultats obtenus dans le cadre de la présente recherche recommandent un rayon de 3,5 km.

BIBLIOGRAPHIE

ACHARD, F. (1993) Méthodes pour l'étude de la végétation et des ressources fourragères d'une zone pastorale : analyse floristique, mesures de la phytomasse, échantillonnage. Université de Niamey. Notes de cours, 23 p.

ALBERGEL, J., CARBONNEL, J.P., GROUZIS, M. (1985) Péjoration pluviométrique au Burkina Faso : incidences sur les ressources en eaux et les productions végétales. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. XXI, No. 1, p. 3-19

ALLEN, P., VAN DUSEN, D., LUNDY, J. and GLIESSMAN, S. (1991) Integrating Social, Environmental, and Economic Issues in Sustainable Agriculture. American Journal of Alternative Agriculture. Vol 6, No. 1, p. 34-39.

ALTAM, D. (1994) Fuzzy Set Theory Approches for Handling Imprecision in Spatial Analysis. International Journal of Geographic Informations Systems, Vol. 8, No. 3, p. 271-289.

ALTIERI, M. (1989) Agroecology : A New research and Development Paradigm for World Agriculture. Agriculture, Ecosystems and Environment 27, p. 37-46

ARCHER, S. and SMEINS, F. S. (1991) Ecosystem-Level Processes. In *Grazing Management: An Ecological Perspective*. Ed. Heitschmidt, R.K. and Stuth, J.R. p. 109-139.

ARONOFF, S. (1989) Geographic Informaton Sytems : a Management Perspective . Ottawa WDL Publications, 294 p.

ASRAR, G.M.F., KANEMASU, E.T. and HATFIELD, J.L. (1984) Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat. Agronomy Journal, Vol. 76, p. 301-306.

BADIARA, L. (1986) Contribution à l'étude de l'évolution saisonnière des états de surface des zones pâturées sur le bassin versant de la mare d'Oursi, Burkina Faso. Mémoire de fin d'études, IDR. 146 p.

BANAI, R. (1993). Fuzziness in Geographical Information Systems : contributions from the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 7, No. 4, p.315-329.

BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F. and HUETE A.R. (1995) A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*. Vol. 13, p. 95-120.

BEGON, M. HARPER, J. L. and TOWNSEND, C. R. (1986) *Ecology : Individuals, Populations and Communities*. Sinauer, Sunderland, MA. USA.

BILLE, J.C. (1980) Measuring the Primary Palatable Production of Browse Plants. Colloque international sur les fourrages ligneux en Afrique. Addis-Abeba , 8 – 12 Avril 1980. 11 p.

BOUDET, G. et RIVIÈRE, R. (1968) Emploi pratique des analyses fourragères pour l'appréciation des pâturages tropicaux. *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays tropicaux*, No. 21, Vol. 2, p. 227-266.

BOUDET, G. (1978) Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. IEMVT, Ministère de la Coopération, Paris. 254 p.

BREMAN, H. (1975) La capacité de charge maximale des pâturages maliens. In *Inventaire et cartographie des pâturages tropicaux africains. Actes du colloque. Bamako-Mali, 3-8 Mars 1975*. ILCA, Addis Abeba, p. 249-256.

BREMAN, H. et de RIDDER, N. (1991) Manuel sur les pâturages des pays sahéliens. DLO, Centre de Recherches agro-biologiques, Wageningen. Editions Khartala, Paris

BREMAN, H. et TRAORÉ, N. (Eds) (1987) Analyse des conditions de l'élevage et propositions de politiques et de programmes. Burkina Faso. Sahel D(87) 302. OCDE/CILSS/Club du Sahel, Paris, 243 p.

BRISKE, D.D. and HEITSCHMIDT, R.K. (1991). An Ecological Perspective. In *Grazing Management : an Ecological Perspective*. Ed. Heitschmidt, R.K. and Stuth, J.R, p. 11-26.

BUNASOLS (1989) Étude pédologique de la mare d'Oursi. Échelle 1/10 000. Rapport technique 61. Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage/ PNUD- FAO Projet BKF/87/020. 36 p. + carte.

BUNASOLS (1989) Étude pédologique de reconnaissance de la région Nord mare d'Oursi, Échelle 1/50 000, Rapport technique 63, Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage/ PNUD- FAO Projet BKF/87/020, 136 p.

BURROUGH, P.A. (1989) Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment. Clarendon Press, Oxford, 193 p.

CARLSON, D.H. and THUROW, T.L. (1993) Biophysical Simulation Models as a Foundation for Decision Support Systems. In *Decision Support Systems for the Management of Grazing Lands : Emerging Issues . Man and the Biosphere Series*, J.W. Stuth and B.G. Lyons (Ed), Vol. 11 Parthenon Publishing Group, London, p. 37-67.

CARLSON, D.H. and THUROW, T.L. (1996) Comprehensive Evaluation of the Improved SPUR Model.(SPUR-91). *Ecological Modelling*, No. 85, p. 229-240.

CARTER, J.R. (1989) On Defining the Geographic Information System. In '*Fundamentals of Geographic Information Systems : A compendium*. W.J. Ripple, Ed. Falls Church, VA : ASPRS/ACSM, p.3-7.

CAUGHLEY, G. and LAWTON, J. H.(1981) Pant-Herbivore Systems, In *Theoretical Ecology : Principles and Applications*, Edited by Robert M. May, Second Edition Blackwell Scientific Publications, p. 133-166.

CHAN, T.O. and WILLIAMSON, I.P. (1995) Justification of GIS as an Infrastructure Investment – some Observations Regarding GIS management in Victoria. In *Proceedings of the 23rd Annual International Conference and Technical Exhibition of the Australasian Urban and Regional Information Systems Association Incorporated*, (Melbourne, 20th-24th November 1995 : AURISA 95), p. 492-503.

CHAN, T.O. and WILLIAMSON, I.P. (1999) The Different Identities of GIS and GIS Diffusion. *Int. J. Geographical Information Science*, Vol. 13, No. 3, p. 267-281.

CHEVALLIER , P., CLAUDE, J., POUYAUD, B. et BERNARD, A. (1985) Pluies et crues au Sahel : Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina Faso 1976-1981) Tr. et Doc. ORSTOM, Paris, No. 190, 251 p.

CHEVALLIER, J.J. et DAUDELIN, S. (1996) La géomatique pour l'aide à la décision en gestion des ressources naturelles : exemple de la protection des paysages forestiers. *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 6, No. 1, p. 11-25.

CISSÉ, M. I. (1980) The browse of some trees of the Sahel : Relationships between Maximum Foliage Biomass and Various Physical Parameters, Colloque International sur les fourrages ligneux en Afrique. Addis-Abéba, 8 – 12 Avril 1980, 5 p.

CLAUDE, J., GROUZIS, M. et MILEVILLE, P. (1991) Un espace Sahélien. La mare d'Oursi - Burkina Faso. Éditions ORSTOM., 241 p.

COLLET, C. (1995) IDRISI, un SIG en mode image. Presses de la SNI Jacques et Demontrod, Besançon, 700 p.

COQUILLARD, P. et HILL, D. R. C. (1997) Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Éditions Masson. 273 p.

CURRAN, P.J. (1983) Multispectral Remote Sensing for the Estimation of Green Leaf Area Index. Philosophical Transactions Royal Society London A.309, p. 257-270.

DAVIS, F. W., SCHIMEL, D.S., FRIEDL, M.A., MICHAELSON, J.C., KITTEL, T., DUBAYAH, R., and DOZIER, J. (1992) Covariance of Biophysical Data with Digital Topographic and Landuse Maps over the FIFE Site. Journal of Geographical Research, No. 97, p. 19 009-19 021.

DEMERS, M.N. (1997) Fundamentals of Geographic Information Systems. John Wiley & Sons, Inc. 485 p.

DEVINEAU, J. L., FOURNIER, A., LAMACHÈRE J.M. (1986) Programme d'évaluation préliminaire SPOT. PEPS No. 149 - SPOT Oursi. Centre ORSTOM de Ouagadougou, 52 p.

DEVINEAU, J.L., FOURNIER, A., LAMACHERE, J.M. et MALECK, C. (1992) Le programme d'évaluation préliminaire SPOT. PEPS No. 149 - SPOT Oursi. Observation au sol, photointerprétation et traitements numériques d'images satellitaires sur le bassin versant de la mare d'Oursi. Colloque Scientifique International sur la mare d'Oursi. Ouagadougou, 17-21 Février, 20 p.

DICKINSON, H. and CALKINS, H. (1988). The Economic Evaluation of Implementing a GIS. International Journal of Geographic Information System, Vol. 54, No. 11, p. 1551-1554.

DIDIER M. (1990) Utilité et valeur de l'information géographique. Éd. Economica, Paris. 255 p.

DIDIER, M. et BOUVERON C. (1993) Guide économique et méthodologique des SIG. Hermès , Paris. 330 p.

DUCHAUFFOUR, P. (1995) Précis de pédologie. 2^{ème} édition. Masson & Cte, Éd.. 481p.

EHLICH, D., ESTES, J.E. and SINGH, A. (1994) Applications of NOAA- AVHRR 1 km Data for Environmental Monitoring. Int. J. Remote Sensing. Vol. 15, No. 1, p. 145-161.

ESCADAFAL, R. et HUETE, (1991) Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquées à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. CR Acad Sci Paris, t.312, Série II, p. 1385-1391.

FRIEDL, M.A., MICHAELSEN, J., DAVIS, F.W., WALKER, H. and SCHIMEL, D.S. (1994.) Estimating Grassland Biomass and Leaf Area Index using Ground and Satellite Data. Int. J. Remote Sensing, Vol.15, No. 7, p.1401-1420.

FRONTIER, S. et PICHOD-VALE., D. (1993) Écosystèmes : structure – fonctionnement – évolution. Collection d'écologie 21, 2^{ème} Éd., Masson., 447 p.

GANABA, S. (1994) Rôle des structures racinaires dans la dynamique du peuplement ligneux de la région de la marre d'Oursi (Burkina Faso) entre 1980 et 1992. Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle 146 p. + annexes.

GODRON, M., DAGET, Ph., EMBERGER, L., LONG, G., Le FLOCH, E., POISSONNET, J., SAUVAGE, Ch. et WACQUANT, J-P. (1969) Vade-mecum pour le relevé méthodique de la végétation du milieu. Centre National de la Recherche Scientifique , Paris, 155 p.

GOODCHILD, F.M., PARKS, B. O. AND STEYAERTM L.T (1993) Environmental Modelling with GIS. Oxford University Press, New York. 488 p.

GROUZIS, M. (1988) Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso), Éditions ORSTOM - Collection Études et thèses, 336 p.

GUYOT, G. (1997) Climatologie de l'environnement : Bioclimatologie de la plante aux écosystèmes. Éd. Masson., Paris. 505 p.

GUYOT, G. and GU, X.-F. (1994). Effect of Radiometric corrections on NDVI-Determined from SPOT-HRV and LANDSAT-TM Data. *Remote Sens. Environ.*, 49, p. 169-180.

HANSON, J. D., ANDERSON, G. L. and HAAS, R.H. (1992) Combining Remote Sensing Techniques with Simulation Modelling for Assessing Rangeland Resources. *Geocarto International*, No.1, p. 101-104.

HANSON, J. D., SKILES, J.W. and PARTON, W.J. (1988) A Multi-Species Model for Rangeland Plant Communities. *Ecological Modelling*, No. 44, p. 89-123.

HARWOOD, R.R. (1990) A History of Sustainable Agriculture. In *Sustainable Agriculture Systems. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, CA*. Edward (Editor)

HIERNEAUX, P.H.Y. (1992) Le suivi des fourrages herbacés du Sahel en saison sèche. Qu'apporte la télédétection ? In *Actes de l'atelier sur les Applications de la Télédétection au Suivi des Ressources Pastorales au Sahel, Namey- Octobre*. p. 92-100.

HILLEL, D. (1988) L'eau et le sol : Principes et processus physiques. Collection Pédasup No 5, Édition Academia, Louvain-la-Neuve, 288 p.

HINTON, J.C. (1996) GIS and Remote Sensing Integration for Environmental Applications. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol.10, No. 7, p. 877-890.

HUETE, A.R., LIU, H., de LIRA, G.R., BATCHILY, K., ESCADAFAL, R. (1994) Soil Color Index to Adjust for Soil and Litter Noise in Vegetation Index Imagery of Arid Regions. *Proceedings of the 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, v 2 1994. IEEE, Piscataway, NJ, USA,94CH3378-7. p 1042-1043

IRBET, 1996. Carte des formations végétales de l'Oudalan. Sahel Burkinabe, 1/50 000.

JANKOWSKI, P. (1995) Integrating Geographical Information Systems and Multicriteria Decision-Making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 9, No. 3, p. 251-273.

JUSTICE, C.O. and HIERNEAUX, P.H.Y. (1986) Monitoring the Grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR Data : Niger 1983. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 7 , No. 11, p. 1475-1497.

KESSLER, J.J. (1994) Usefulness of the Human Capacity Concept in Assessing Ecological Sustainability of Land-Use in Semi-Arid Regions. *Agriculture, Ecosystems and Environments*, No. 48, p. 273-284.

LANGE, R.T., LAY, B.G. and TYNAM, R.W. (1994) Evaluation of Extensive Arid Rangelands : the Land Condition Index (LCI). *Transactions Royal Society of South Australia*, 118 (1-2), p. 125-131.

LAURINI, R. et MILLERET-RAFFORT, F. (1993) *Les bases de données en géomatique*. Éditions Hermes, 339 p.

Le HOUÉROU, H.N. (1980) Chemical Composition and Nutritive Value of Browse in Tropical West Africa. *Colloque International sur les fourrages ligneux en Afrique*. Addis-Abéba, 8 – 12 Avril 1980, 13 p. + annexes.

Le HOUÉROU, H.N. and HOSTE, C.H. (1977) Rangeland Production and Annual Rainfall Relations in the Mediterranean Bassin and in African Sahelo-sudanian Zone. *Journal of Range Management*, No. 30, p. 181-189.

Le MASSON, A. (1980) Situation de l'élevage bovin dans la sous-préfecture de l'Oudalan (Gorom-Gorom). *Rapport d'activités 1977-1979*. CIDR, No. 228. 177 p.

LEPRUN, J.C. (1977) Esquisse pédologique au 1/50.000 des alentours de la Mare d'Oursi avec notice et analyse des sols. Acc Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, DGRST-ORSTOM. 53 p. + cartes.

LO SEEN, D., MOUGIN, E., RAMBAL, D. S., GASTON A. and. HIERNAUX, P. (1995) A Regional Sahelian Grassland model to be Coupled with Multispectral Satellite Data. II : Toward the Control of its Simulations by Remotely Sensed Indices. *Remote Sensing of Environnement*, No.52, p. 194-206.

LUNAM, J. K. and ROBERT, W.H. (1989) Sense and Sustainability : Sustainability as an Objective in International Agriculture, *Agriculture Economics* 3, p. 381-398.

MacRAE R.J., HILL, S.B., HENNING, J. and MEHUYS, G.R. (1989) Agriculture Science and Sustainable Agriculture : A Review of the Existing Scientific Barriers to Sustainable food Production and Potential solutions. *Biological Agriculture and Horticulture* 6, p. 173-219.

MAGUIRE, D.J. (1991) An Overview and Definition of GIS. In *Geographical Information Systems : Principles and Applications*, edited by MAGUIRE, D.J., GOODCHILD, M.F., and RHIND, D.W. (New York : Longman Scientific and Technical, John Wiley and Sons, Inc.), p. 9-20.

MALINGREAU, J.P., TUCKER, C.J. and LAPORTE, N. (1989) AVHRR for Monitoring Global Tropical Deforestation. *International Journal of Remote sensing*. No. 10, p. 855-867.

MAY, R.M. (1981) Models for Two Interacting Populations, in *Theoretical Ecology : Principles and Applications*, Edited by Robert M. May, Second Edition Blackwell Scientific Publications, p. 78-105.

MCKINION, J.M. and BAKER, D.N. (1982) Modelling, Experimentation, Verification and Validation : Closing the Feedback loop. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, Vol. 25, p. 647-653.

MCNEIL, M.D., SLIKES, J.W. and HANSON, J.D. (1985) Sensitivity Analysis of a General Rangeland Model. *Ecological Modelling*, No. 29, p. 57-76.

MILLER, W. A., HOWARD, S.M. and MOORE, D.G. (1986) Use of AVHRR Data in an Information System for Fire Management in the Western United States. *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Remote Sensing of Environmental*, Nairobi, Kenya, p. 67-79.

MOUGIN, L.S.E., RAMBEL, D.S., GASTON, A. and HIERNAUX, P. (1995) A Regional Sahelian Grassland Model to be Coupled with Multispectral Satellite Data. I : Model Description and Validation. *Remote Sensing of Environnement*, No. 52, p. 181-193.

NÉBOUT, J.P. et TOUTAIN, B. (1978) Étude sur les arbres fourragers dans la zone sahéenne (Oudalan voltaïque). CIFT-IEMVT, Maisons-Alfort, Paris, 119 p.

OLSON, L. RICHARD, P., SHARPE, J. H. and WU, Hsin-I. (1985) Whole-Plant Modelling : a Continuous-Time Markov Approach (CTM), *Ecological Modelling*, Vol. 29, p. 171-187.

PARENT, S. (1990) *Dictionnaire des sciences de l'environnement*. Éditions Broquet Inc. 748 p.

PENNING DE VRIES, F.W.T. et DJITÈYE, M.A. (Eds) (1982) La productivité des pâturages sahéens, une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. *Agric. Res. Rep. 918*. Pudoc, Wageningen., ISBN 90-220-0806-1, 525 p.

PEREIRA, J. M.C. and DUCKSTEIN, L. (1993) A Multiple Criteria Decision-Making Approach to GIS-Based land Suitability Evaluation. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol.7, No. 5, p. 407-424.

RIOU, G. (1989) *L'eau et les sols dans les géosphères tropicales*. Ed. Masson, collection Géographie. 221 p.

RIVIÈRE, R. (1978) Manuel d'alimentation des ruminants domestiques en milieu tropical. Manuels et précis d'élevage, Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux, 2^{ème} édition. 527 p.

ROBERTS, D., W. (1996) Landscape Vegetation Modelling with Vital Attributes and Fuzzy Systems Theory. Ecological Modelling, No. 90, p.175-184

SAATY, L.T. (1984) Décider face à la complexité. Une approche analytique multicritère d'aide à la décision. Collection Université Entreprise. Les Éditions ESF. 231 p.

SHARPE, J. H., WALKER., P.J., LES, K., SHARPE, J. H. and WU, Hsin-I. (1985) A Physiologically Based Continuous-Time Markov Approach to Plant Growth Modelling in Semi-Arid Woodlands, Ecological Modelling, Vol, 29, p. 188-213.

SMIT B. and SMITHERS, J. (1994) Sustainable Agriculture : Interpretations, Analyses and Prospects. Canadian Journal Regional Sciences .

STANTON, N.L. (1988) The underground in Grasslands. Ann. Rev. Ecol. Syst. Vol. 19, p. 573-589.

TOUTAIN, B. (1976) Notice de la carte des ressources fourragères au 1/50.000. ACC. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. IEMVT, Maisons Alfort, 61 p.

TOUTAIN, B. et De WISPELELAERE, G. (1978) Étude et cartographie des pâturages de l'ORD du Sahel et de la zone de délestage au Nord-Est de Fada-N'Gourma (Haute-Volta). IEMVT, Maisons-Alfort, No. 51. 3 tomes +cartes 1/200000

TOWNSHEND, J. R. G. and JUSTICE, C. O. (1986) Analysis of the Dynamics of African Vegetation using the Normalized Difference Vegetation Index. International Journal of Remote Sensing. No. 7, p. 1435-1445.

TUCKER, C. J., TOWNSHEND, J. R. G. and GOFF, T. E. (1985) African Land-Cover Classification Using Satellite Data, Science No. 227, p. 369-375.

TUCKER, C.J. and SELLERS, P. J. (1986) Satellite Remote Sensing of Primary Production. International. Journal of Remote Sensing. No. 7, p. 1395-1416.

TYC, J. (1992) Diagnostic et recommandations en matière d'exploitation et de commercialisation du bétail et de la viande dans les provinces du Seno et de l'Oudalan., PSB, Projet de Développement Rural Intégré de la province du Seno, BKF/90 X01.82 p.

UNDP (1998) Human Development Report. Oxford University Press. 228 p.

UNITED NATIONS (1992). Agenda 21. United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), Rio de Janeiro, June 3-14, 1992. Conches Switzerland

VOLTERRA, V. (1926). Variations and Fluctuations of the Number of Individuals in Animal Species Living together. J. Cons. Perm. Int. Ent. Mer No 3, pp. 3-51.

WIGHT, J. R. and SKILES, J. W. (Editors) (1987) SPUR - Simulation of Production and Utilization of Rangelands : Documentation and Users Guide. USDA- ARS – No. 63.

WILLIAMSON, H.D., 1989. Reflectance from Shrubs and under Shrubs Soil in a Semi Arid Environment. Remote Sensing of Environment, No. 29, p. 263-272.

WORLD BANK (1996) Toward Environmentally Sustainable Development in Sub-Saharan Africa. A World Bank Agenda. World Bank Publication, 140 p.

WU, H., BAI-LIAN, L., REVIN, S. and YANG, L. (1996) A Semi-Arid Grazing Ecosystem Simulation Model with Probabilistic and Fuzzy Parameters. Ecological Modelling, No. 90, p. 147-160.

WYLIE, B.K., HARRINGTON, J.A, PIEPET, R.D. and DENDA, I. (1992) A Satellite-based Range Assessment System for the Sahel of Africa. *Geocarto International* , No. 1, p. 79-85.

YUNLONG, C. and SMIT, B. (1994) Sustainability in Agriculture : a General Review. *Agriculture Ecosystems & Environment*, Vol. 49, p.299-307.

ZADEH, L.A. (1973) Outline of the New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Trans. Syst., Man., Cybern., SMC*, No. 3, p. 28-44.

ZOMBRÉ, N. P. (1996) Étude des unités morphologiques de la province de l'Oudalan. *PSB/Pays-Bas*. 170 p.

ANNEXES

Annexe 1 : Guide de programmation

Annexe 1-A : Simulation de la biomasse primaire

Étape 1 : Initialisation des paramètres intrants

Spatialiser les paramètres correspondant à l'année 0 (toutes les cartes ont la même géoréférence et sont de même taille matricielle) :

- le taux de couverture basale : C_0
- la pression cumulée de pâture : X_0
- la charge animale : H_0
- l'état écologie du milieu : K_0
- la pression animale de référence : GP_{ref}
- la production maximale de biomasse : V_{max} (équation 4.18)
- la pente : S
- l'indice d'accès à la santé : I_{AS} (équation 4.23)
- l'indice d'accès à l'éducation : I_{AE} (équation 4.24)
- l'indice de disponibilité en eau d'abreuvement : I_{DE} (équation 4.25)
- l'indice de surexploitation agricole : I_{SAG} (équations (4.21 & 4.22).

Initialiser les constantes m , h , cr , g , s , σ , R_{ref} , N_{jr} , B_H , l .

Étape 2 : Calcul de la biomasse de l'année 0

- calculer V_0 : équation 4.17.

Étape 3 : Détermination des paramètres intrants à t_0

- calculer l'indice de pluviométrie R_0 : équation 4.12
- calculer l'indice d'humidité RC_0 : équation 4.16

- calculer la pression animale GP_0 : équation 4.11
- calculer l'indice de surpâturage $O_G(0)$: équation 4.9
- calculer les impacts positifs et négatifs des paramètres de production primaire : $L_{+(0)}$ et $L_{-(0)}$: équations 4.4 & 4.5 pour la simulation selon le modèle standard. Pour le modèle de Wu modifié, appliquer les équations 4.19 & 4.20
- calculer la dégradation du milieu ΔK_0 : équation 4.3
- calculer l'état de sécheresse DS_0 : équation 4.10
- calculer la variation de la pression de pâture ΔX_0 : équation 4.8
- calculer l'état de reproduction des animaux selon la disponibilité de la biomasse $B_V(0)$: équation 4.15
- calculer la charge animale potentielle H_0 : équation 4.14.

Étape 4 : Simulation de la biomasse de l'année 1 (détermination des paramètres à t_1 et calcul de V_1)

- calculer X_1 : équation 4.7
- calculer C_1 : équation 4.6
- calculer K_1 : équation 4.2
- calculer H_1 : équation 4.13
- calculer C_1 : équation 4.6
- calculer RC_1 : équation 4.16
- calculer V_1 : équation 4.1.

Répéter les étapes 3 & 4 pour chaque année (t+1) jusqu'à t_{max} :

t_0 correspond à l'année 1986,

t_{max} correspond à l'année 1996.

Annexe 1-B : Élaboration des scénarios de gestion et des circuits de transhumance

Pour chaque scénario de production :

- 1 calculer la biomasse I (V) par UP : moyenne des V/UP pour les années de simulation (ici 10 ans)
- 2 déterminer la composition floristique / UP (traitements des données *in situ*)
- 3 déterminer la qualité du fourrage : teneur en UF et MAD (résultats des analyses bromatologiques)
- 4 Calculer UF et MAD par UP et par période d'exploitation (ici, 3 périodes considérées) selon quantité du fourrage aérien et herbacée disponible
- 5 déterminer besoins de production par UBT (entretien + déplacements + lait ou viande)
- 6 déterminer capacité de charge par UP, par période et type d'exploitation sur la base de la qualité de fourrage,
- 7 déterminer la quantité de fourrage que l'UBT peut ingérer par jour selon le type de production
- 8 comparer la quantité et la qualité
- 9 déterminer le niveau de déficit ou surplus selon qualité et quantité
mettre à jour
- 10 déterminer la production secondaire
- 11 déterminer le déficit en UBT
- 12 déterminer les zones de transhumance :
 - a) fixer un seuil de tolérance pour l'accès à l'eau (ici : 0,66),
 - b) calculer le seuil de biomasse primaire tolérable sur la base de la charge durable,
 - c) fixer un seuil pour l'indice de surexploitation agricole,
 - d) appliquer les conditionnalités des critères pour déterminer les zones et circuits de transhumance.

Annexe 2 A : Classification des années selon la pluviométrie

Année	Déou	Gorom	Korizena	Markoye	Oursi	Salmossi	Saouga	Tasmakatt	Tin Akoff
1986	Sèche	Normale	Normale	Sèche	Sèche	Sèche	Normale	Sèche	Sèche
1987	Sèche	Sèche	Sèche	Sèche	Sèche	Sèche	Sèche	Sèche	Normale
1988	Normale	Normale	Normale	Normale	Humide	Normale	Humide	Normale	Normale
1989	Sèche	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Normale	Normale
1990	Sèche	Normale	Normale	Normale	Normale	Normale	Sèche	Normale	Normale
1991	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide
1992	Sèche	Normale	Sèche	Normale	Normale	Humide	Sèche	Normale	Sèche
1993	Sèche	Normale	Normale	Normale	Normale	Normale	Sèche	Sèche	
1994	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide
1995	Normale	Normale	Normale	Sèche	Normale	Normale	Normale	Normale	Normale
1996	Normale	Sèche	Sèche	Normale	Normale	Normale	Sèche	Sèche	Normale

Annexe 2. B : Critères de classification (observations 1986-1996)

Poste	Moyenne	Année sèche	Année humide
Déou	346	277	415
Gorom	377	301	452
Korizena	347	278	417
Markoye	295	236	353
Oursi	320	256	384
Salmossi	323	259	388
Saouga	329	263	395
Tasmakatt	342	273	410
Tin Akoff	293	235	352

Annexe 3 : Classification des années sur 42 années d'observation pour Gorom

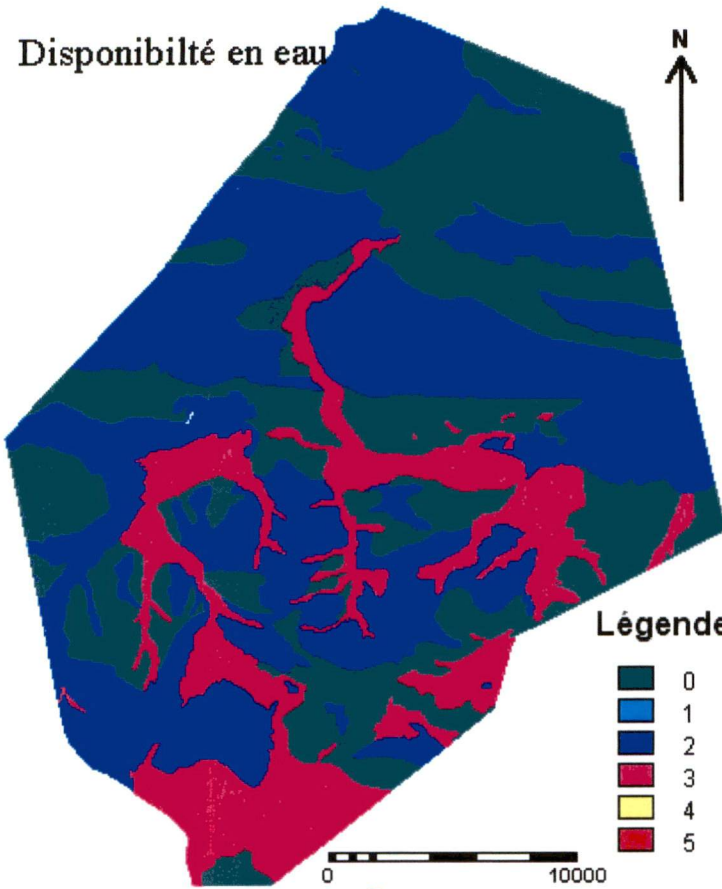
Année	Pluviométrie (mm)	Qualification
1986	329	Sèche
1987	212	Sèche
1988	326	Sèche
1989	477	Normale
1990	364	Normale
1991	631	Humide
1992	645	Humide
1993	332	Sèche
1994	589	Humide
1995	353	Normale
1996	255	Sèche

Annexe 4 : Description floristique des UP:

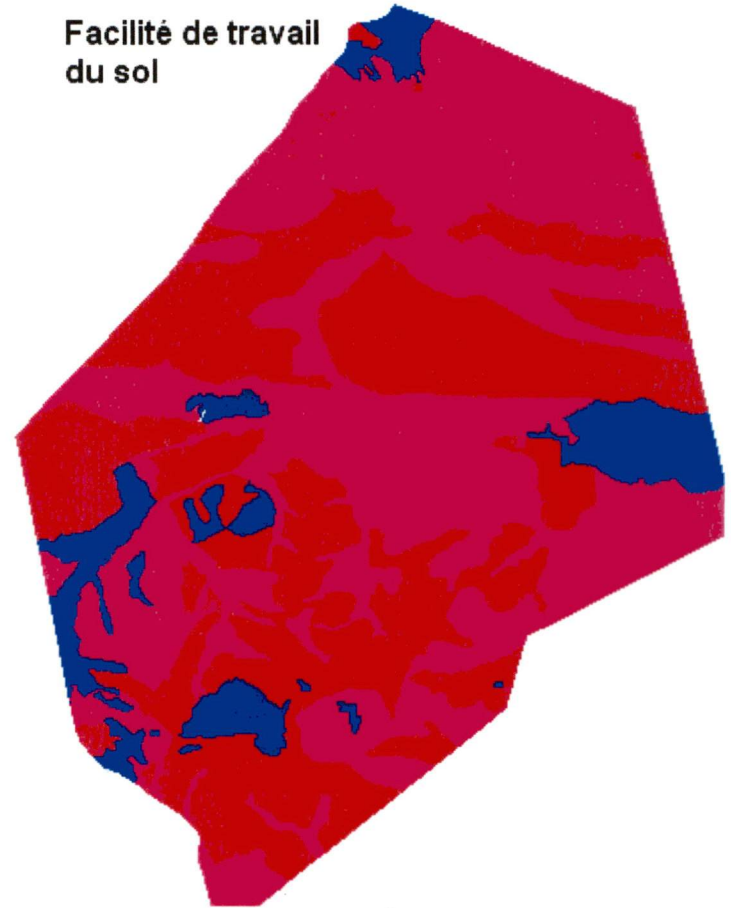
Type de formation végétale	UP	Ligneux dominants	Herbacées dominantes
Steppe herbeuse des formations sur dunes fixes	Aa	<i>Balanites aegytiaca</i> <i>Acacia raddiana</i>	<i>Cenchrus biflorus</i> <i>Setaria pallefudisca</i>
	Ab	<i>Balanites aegytiaca</i> <i>Combretum glutinosum</i> <i>Acacia raddiana</i>	<i>Cenchrus biflorus</i> <i>Zornia glochidiata</i> <i>Shoenefeldia gracilis</i>
	Ae	<i>Acacia raddiana</i> <i>Balanites aegytiaca</i>	<i>Shoenefeldia gracilis</i> <i>Cloris pilosa</i> <i>Dactyloctenium aegyptium</i>
Steppe herbeuse à arbustive sur glacis et pénéplaines limono-sableux	Ba	<i>Balanites aegytiaca</i> <i>Acacia raddiana</i> <i>Leptadenia pyrotechnica</i>	<i>Shoenefeldia gracilis</i> <i>Cenchrus biflorus</i> <i>Aristida funiculata</i>
	Bb	<i>Acacia raddiana</i> <i>Acacia seyal</i>	<i>Aristida funiculata</i> <i>Shoenefeldia gracilis</i> <i>Dactyloctenium aegyptium</i>
	Bc	<i>Acacia raddiana</i> <i>Balanites aegytiaca</i>	<i>Panicum laetum</i> <i>Shoenefeldia gracilis</i> <i>Eragrotis tremula</i>
Steppe arbustive à fourrés sur zones gravillonnaires	Db	<i>Cadaba farinosa</i> <i>Calotropis procera</i> <i>Leptadenia hastata</i>	<i>Panicum laetum</i> <i>Aristida funiculata</i> <i>Shoenefeldia gracilis</i>
	Dc	<i>Acacia seyal</i> <i>Acacia laeta</i> <i>Acacia senegal</i>	<i>Aristida funiculata</i> <i>Shoenefeldia gracilis</i> <i>Tribulus terrestris</i>
Steppe arborée dense des zones hydromorphes	McHb	<i>Acacia seyal</i> <i>Acacia raddiana</i> <i>Balanites aegytiaca</i>	<i>Echinochloa colona</i> <i>Panicum laetum</i> <i>Alysicarpus ovalifolium</i> <i>Cassia tora</i>
Prairie aquatique des mares sahéliennes	Ma		<i>Echinochloa stagnina</i> <i>Oryza longistaminata</i>
Jachères récentes et cultures	JC	<i>Acacia raddiana</i>	<i>Cenchrus biflorus</i> <i>Setaria pallefudisca</i>
Affleurements rocheux	R		
Dune vive	Dv		

Annexe 5 : Carte-images des critères d'aptitude des sols pour l'agriculture pluviale au Sahel

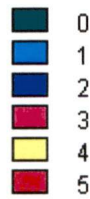
Disponibilité en eau



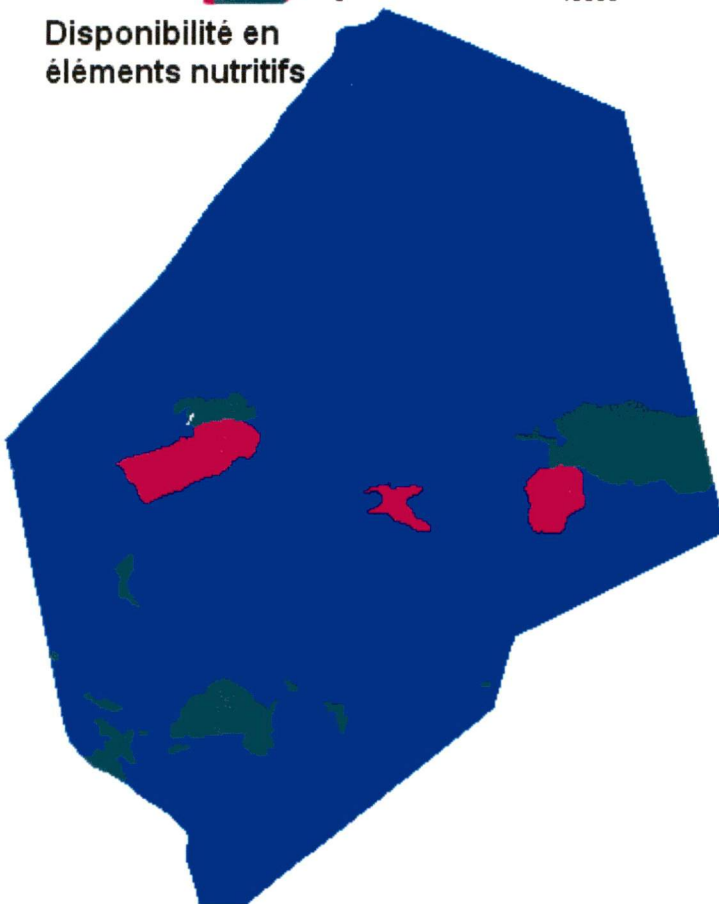
Facilité de travail
du sol



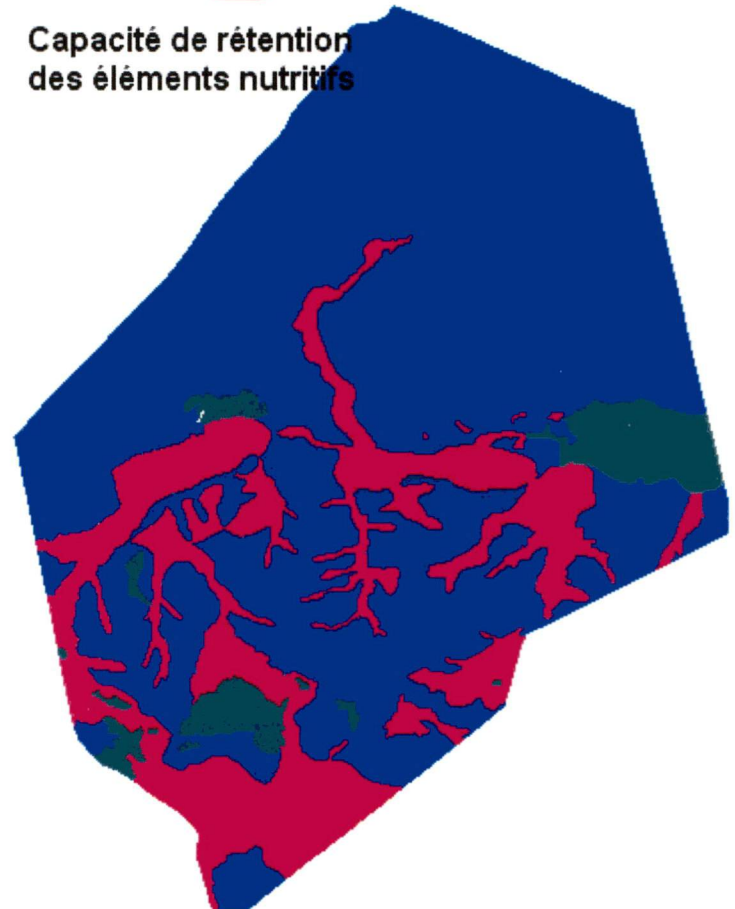
Légende



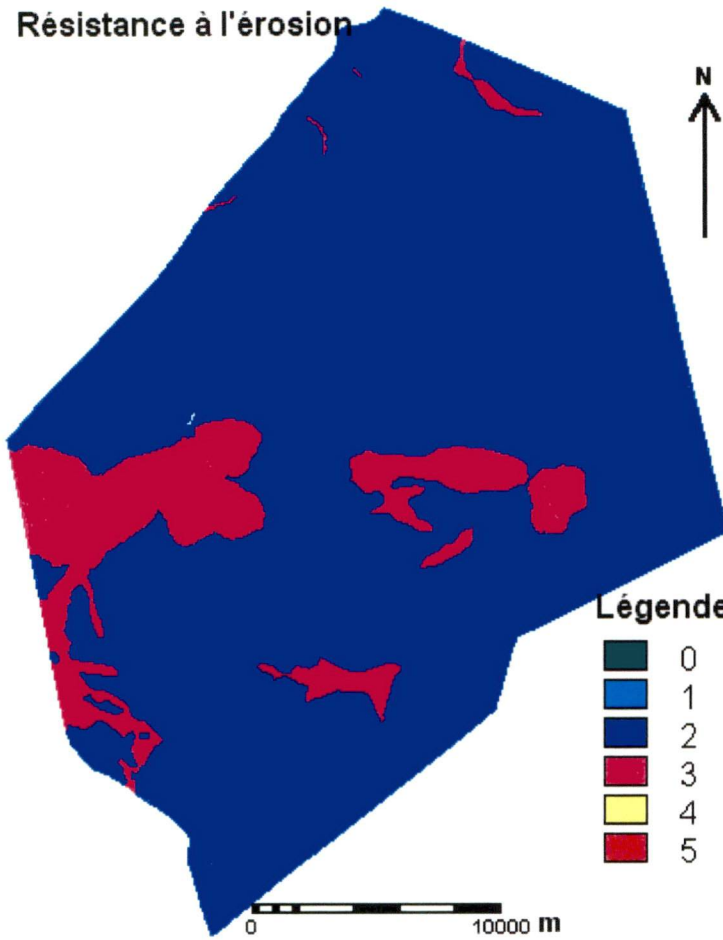
Disponibilité en
éléments nutritifs



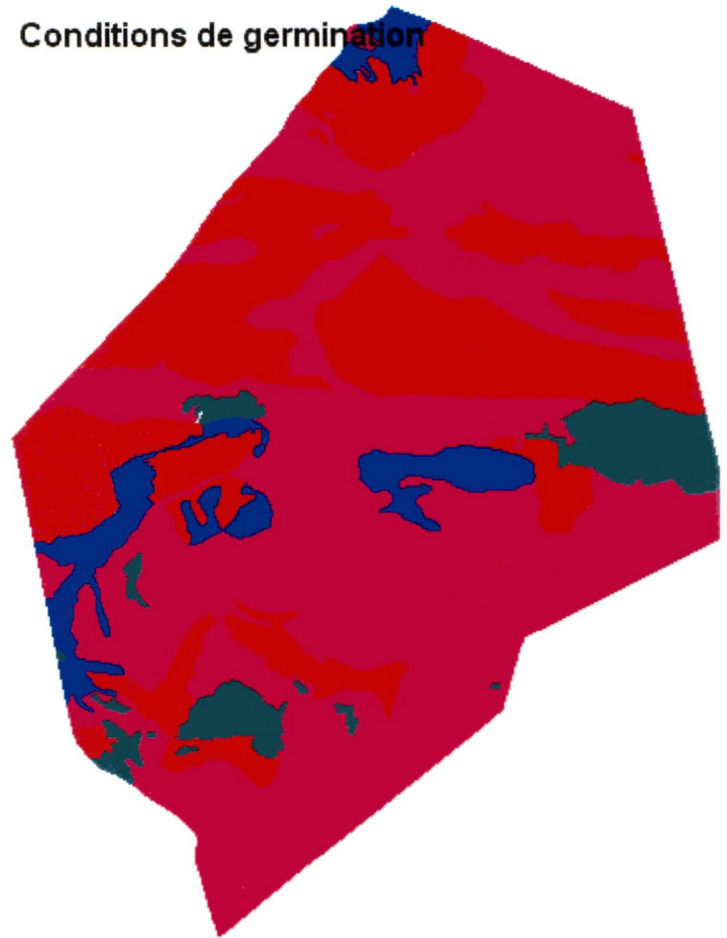
Capacité de rétention
des éléments nutritifs



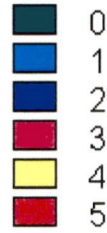
Résistance à l'érosion



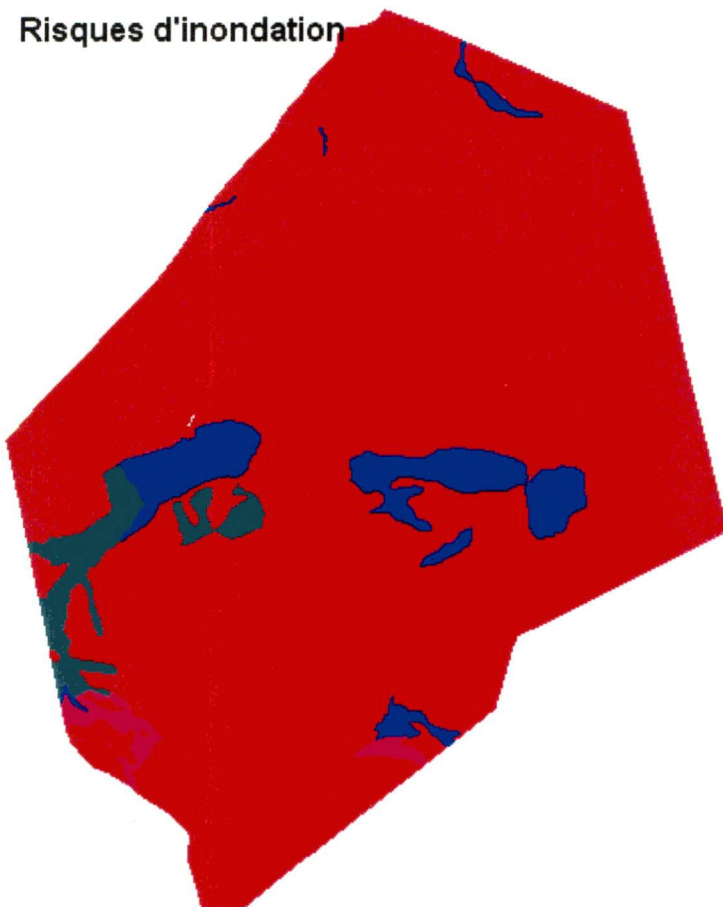
Conditions de germination



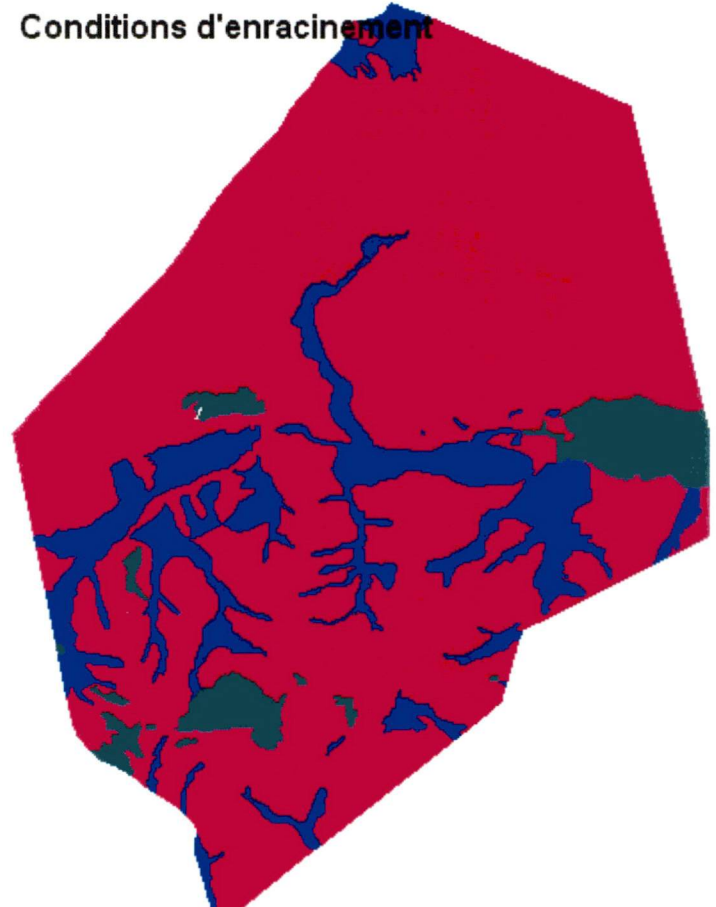
Légende



Risques d'inondation



Conditions d'enracinement

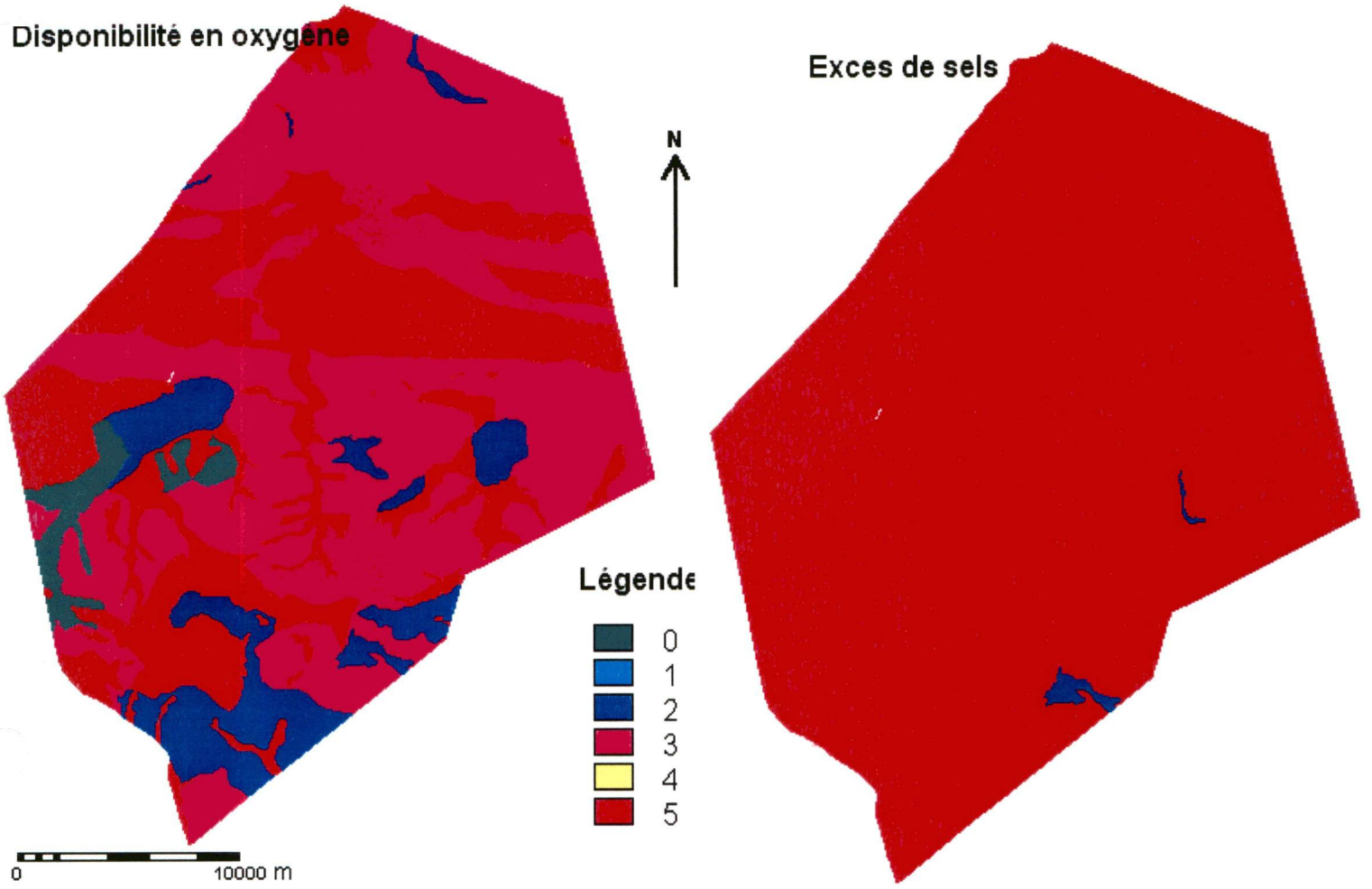
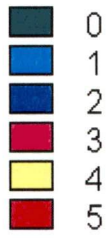


Disponibilité en oxygène

Exces de sels



Légende



Annexe 6 : Aptitude des unités de sol pour l'agriculture

UNITE	ér	rin	ger	trs	disE	dn	crn	rac	oxy	sel
u1	2	5	0	2	3	0	0	0	5	5
u2	2	5	0	2	2	0	0	0	3	5
u3	2	5	2	2	2	2	2	2	5	5
u4	3	0	2	2	2	2	3	2	0	5
u5	3	2	2	3	3	2	3	2	3	5
u6	2	5	5	5	2	2	2	3	5	5
u7	3	5	5	5	0	2	2	3	5	5
u8	3	3	3	3	2	2	3	3	3	5
u9	2	5	3	5	0	2	2	3	3	5
u10	2	5	5	3	2	2	2	3	3	5
u11	2	5	3	5	3	2	3	3	2	5
u12	2	5	3	5	2	2	2	3	3	5
u13	2	3	3	5	2	2	2	3	3	5
u14	3	2	5	5	3	3	3	2	2	5
u14	3	2	5	5	3	3	3	2	2	5
u15	3	2	2	3	2	3	3	3	2	5
u16	3	2	3	3	2	2	2	3	2	5
u17	3	2	3	3	3	2	2	3	2	5
u18	2	2	3	3	3	2	3	2	2	2
u19	2	5	3	3	3	2	3	2	5	5

Source : Adapté de BUNASOLS (1989)

S1 = 5 = très apte

S2 = 3 = modérément apte

S3 = 2 = marginalement apte

N = 0 = inapte

Annexe 7 : Exigence des principales cultures de la zone (selon BUNASOLS, 1989)**Culture 1 : Mil**

		S1	S2	S3	N
Climat	T° moyenne période croissance (°C)	25-30	20-25	15-20	< 15
			30-32	32-35	>35
	Pluvio. moyenne (mm)	> 400	300-400	200-300	<200
	Période de croissance (jrs)	> 90	60-90	50-60	<50
Pédologie	Drainage (classe)	4 et 5	3 et 6	2	0 et 1
	Fertilité initiale (classe)	Élevée à assez élevée	Moyenne à assez basse	Basse	
	Profondeur sol (cm)	>100	60-100	30-60	<30
	Aisance de pénétration des racines	Facile	Moyen à difficile	Très difficile	
	Régime d'inondation (fréquence et longueur) (classe)	Nulle	Except. Courte	Occas. courte	Régulière
	Risque d'érosion hydrique (classe)	Nul à faible	Modéré	Élevé	Très élevé
	Risque d'érosion éolienne (classe)	Nul à faible	Modéré	Élevé	Très élevé

S1 = 5 = très apte

S3 = 2 = marginalement apte

Except. = exceptionnellement

Régul. = régulièrement

S2 = 3 = modérément apte

N = 0 = inapte

Occas = occasionnellement

Pluvio. = pluviométrie

Culture 2 : Sorgho

		S1	S2	S3	N
Climat	T° moyenne période croissance (°C)	25-30	20-25 30-32	15-20 32-35	< 15 >35
	Pluviom. Moyenne (mm)	> 500	400-500	300-400	<300
	Période de croissance (jrs)	> 110	90-110	80-60	<80
Pédologie	Drainage (classe)	3 et 4	2	1 et 5	0 et 6
	Fertilité initiale (classe)	Élevée	Assez élevée à moyenne	Assez basse à basse	
	Profondeur sol (cm)	>100	60-100	30-60	<30
	Aisance de pénétration des racines	Facile	Moyen à difficile	Très difficile	
	Régime d'inondation (fréquence et longueur) (classe)	Nulle	Except. Courte	Régul. courte	Régul. Longue
	Risque d'érosion hydrique (classe)	Nul ou faible	Modéré	Élevé	Très élevé
	Risque d'érosion éolienne (classe)	Nul ou faible	Modéré	Élevé	Très élevé

Culture 3 : Niébé

		S1	S2	S3	N
Climat	T° moyenne période croissace (°C)	25-30	15-25 30-35	10-15 35-40	< 10 >40
	Pluviom. Moyenne (mm)	> 500	400-500	300-400	<300
	Période de croissance (jrs)	> 110	80-110	70-80	<70
	<hr/>				
Pédologie	Drainage (classe)	4	3 et 5	2 et 6	0 et 1
	Fertilité initiale (classe)	Élevée à assez élevée	Moyenne	Assez basse à basse	
	Profondeur sol (cm)	>100	60-100	30-60	<30
	Aisance de pénétration des racines	Facile	Moyen à difficile	Très difficile	
	Régime d'inondation (fréquence et longueur) (classe)	Nulle	Except. courte	Occas. courte	Régulier
	Risque d'érosion hydrique (classe)	Nul ou faible	Modéré	Élevé	Très élevé
	Risque d'érosion éolienne (classe)	Nul ou faible	Modéré	Élevé	Très élevé
	<hr/>				

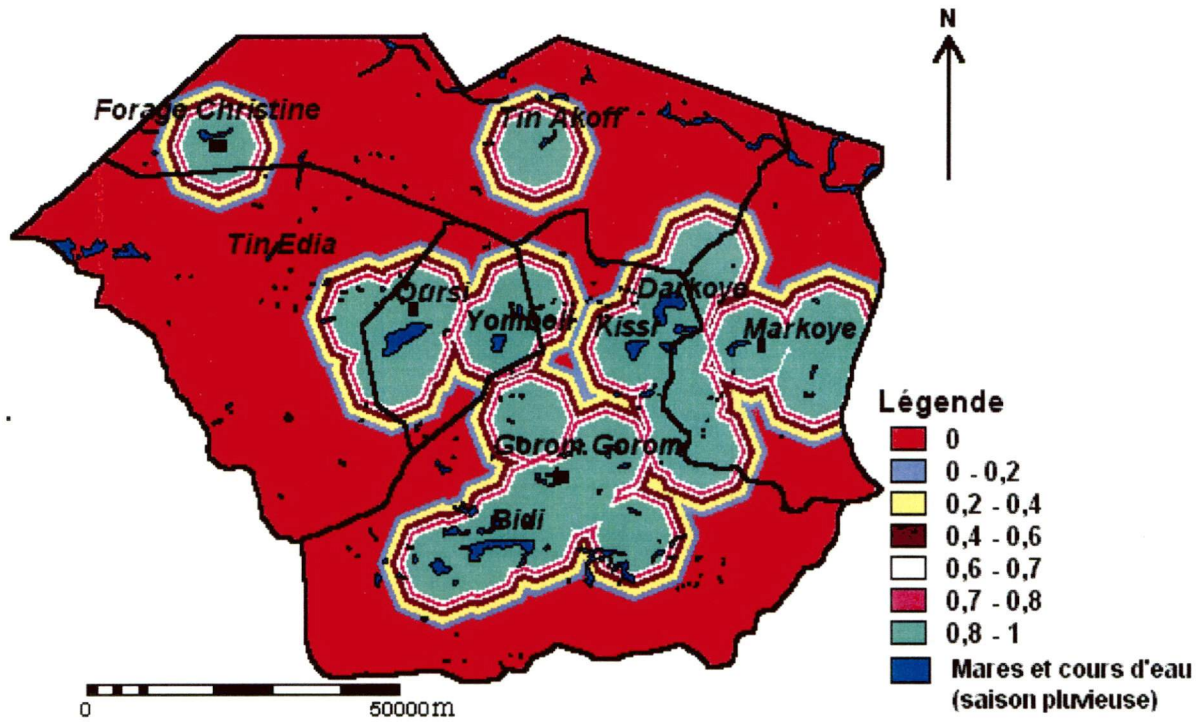
Culture 4 : Arachide

		S1	S2	S3	N
Climat	T° moyenne période croissance (°C)	20-25	15-20 25-30	10-15 30-35	< 10 >35
	Pluviom. Moyenne (mm)	> 400	325-400	250-325	<250
	Période de croissance (jrs)	> 70	40-70	30-40	<30
	<hr/>				
Pédologie	Drainage (classe)	4 et 5	3 et 6	2	0 et 1
	Fertilité initiale (classe)	Élevée à assez élevée	Moyenne à assez basse	Basse	
	Profondeur sol (cm)	>100	60-100	30-60	<30
	Aisance de pénétration des racines	Facile	Moyen à difficile	Très difficile	
	Régime d'inondation (fréquence et longueur) (classe)	Nulle	Nulle à except. courte	Except. courte	Occas. courte
	Risque d'érosion hydrique (classe)	Nul ou faible	modéré	Élevé	Très élevé
	Risque d'érosion éolienne (classe)	Nul ou faible	Modéré	Élevé	Très élevé

Annexe 8 : Description des unités de sol du département d'Oursi

Unité	Types de sols	Description
U1 U2 U3	Minéraux bruts non climatiques d'érosion	Lithosols sur cuirasses ferrugineuses Lithosols sur roches diverses Sols peu évolués : régosols ou sols régiques sur matériaux gravillonnaires, association à lithosols sur cuirasse
U4 U5	Vertisols et paravertisols	Topomorphes non grumosoliques modaux à drainage externe nul sur alluvions argileuses Topolithomorphes grumosoliques modaux sur matériau d'altération issu de roches basiques
U6 U7 U8 U9	Sols isohumiques à complexe saturé	Sols bruns rouges subarides peu différenciés sur sables éoliens pauvres en argile et limon (erg récent) Sols bruns rouges subarides à drainage interne limite en profondeur sur sables éoliens pauvres en argile et limon (erg récent) Sols bruns subarides vertiques sur matériau argileux issus de granite, de roches basiques ou de granites. Associations à sols bruns subarides modaux, hydromorphes et localement à sols gravillonnaires
U10 U11 U12 U13	Sols à sesquioxides	Sols ferrugineux tropicaux peu lessives à drainage interne limite en profondeur sur sables éoliens (erg ancien) Sols ferrugineux tropicaux peu lessives à drainage interne limite en profondeur, association à sables gravillonnaires Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à drainage interne limité en profondeur sur sables éoliens reposant sur l'altération verticale de roches basiques Sols ferrugineux tropicaux lessives indurés ou à taches et concrétions sur arène granitique acide à texture grossière
U14 U15 U16 U17	Sols hydromorphes minéraux	Sols peu humifères sur dépôt de colmatage argilo-sableux à argileux Sols hydromorphes peu humifères à pseudo-gley modaux peu profonds sur matériau sablo-argileux alluvial Sols peu humifères à gley d'ensemble; association à sols hydromorphes à gley de profondeur sur matériaux sableux Sols peu humifères à pseudo gley vertiques, à taches et concrétions ferrugineuses et calcaires sur matériaux de dépôt argileux
U18	Sols hallomorphes (à structure dégradée à alcali lessivés) / sols sodiques	Solonetz à structure en colonnette de l'horizon B sur matériaux argilo-sableux issu de granites, associés à sols bruns subarides vertiques
U19	Sols peu évolués non climatiques d'érosion	Sols peu évolués d'apport alluvial verticale d'érosion

Annexe 9 : Indice de disponibilité de l'eau en saison sèche dans la province de l'Oudalan



Annexe 10 : Carte-image d'indice de surpâturage 1996