

Université du Québec
INRS-Eau

**ÉTUDE DES PARCOURS NATURELS SÉNÉGALAIS
PAR L'APPROCHE COMBINÉE DE LA MÉTHODE CONVENTIONNELLE ET
DE LA GÉOMATIQUE.**

Par
Marième Diallo

Thèse
présentée pour l'obtention
du grade de Philosophiae doctor (PH.D)
en Sciences de l'Eau

1996

RÉSUMÉ

Dans la zone sylvo-pastorale nord du Sénégal, communément appelé le Ferlo, l'élevage est la seule activité de grande envergure permise par les conditions climatiques déficitaires. La gestion des parcours naturels, unique source d'alimentation du bétail, est rendue problématique par l'hydraulique pastorale, notamment par la création de forages dans une zone où, jadis le manque de ressources hydriques durant la longue saison sèche ne permettait pas l'exploitation des pâturages au cours de cette période. L'implantation de ces forages entraîna une déstabilisation de l'activité pastorale par l'abandon des pratiques pastorales traditionnelles, la modification de l'occupation de l'espace et des mouvements de la population et du bétail. La tendance à la sédentarisation autour de ces points d'eau s'est répercutée sur la nature par la dégradation de l'écosystème suite au surpâturage des espaces qui leur sont attenants. Si les nombreuses mares de la saison des pluies ont toujours assuré l'autosuffisance en eau au cours de cette période, leur caractère éphémère représente une limite à leur efficacité. L'exploitation des ressources hydriques entraîne des problèmes de malnutrition, de parasitisme et d'infections liées à l'eau, insuffisante en quantité et en qualité.

D'où le but de cette étude de contribuer à la recherche de solutions à la crise pastorale sénégalaise par le biais d'une analyse des parcours naturels, de leurs utilisations en fonction de la disponibilité d'eau et du fourrage et de l'impact de l'exploitation des ressources hydriques sur la santé humaine et animale. Plus spécifiquement cette étude consistera à procéder au diagnostic du système pastoral à l'aide de données de terrain, à analyser l'influence des facteurs socio-économiques sur le système pastoral et à utiliser la géomatique pour l'évaluation et la cartographie des ressources végétales et hydriques.

La méthodologie utilisée est l'approche conventionnelle de l'étude du système pastoral à travers des indicateurs géographiques et bio-socio-économiques. La qualité des pâturages a été estimée par les relevés de composition floristique; celle de l'eau, à travers des analyses chimiques et bactériologiques grâce à un matériel de terrain, par la colorimétrie, le filtrage et l'incubation à l'aide d'un matériel portatif traitant les échantillons d'eau prélevés sur le terrain. Des enquêtes socio-économiques ont permis d'appréhender le système de gestion des parcours en fonction des saisons et suivant la disponibilité de l'eau et du fourrage.

Cette approche a été complétée par l'application de la télédétection et des systèmes d'information géographique pour la cartographie des ressources disponibles et l'analyse spatiale de la gestion des parcours. L'intégration des données multisources a permis de définir des trajets de moindre coût environnemental pour le bétail et de proposer des solutions à une politique de gestion améliorée des parcours dont le but fondamental est de rapprocher l'eau du fourrage. Celle-ci implique la gestion rationnelle des ressources végétales et hydriques par:

- l'amélioration de la qualité du fourrage et son exploitation plus judicieuse par la conduite de l'alimentation du cheptel; cela évitera les phénomènes de dégradation environnementale;
- l'amélioration de la qualité de l'eau par le traitement des eaux de forage et surtout des mares dont la qualité bactériologique et chimique est très mauvaise et entraîne des répercussions désastreuses sur la santé humaine et animale.
- l'augmentation du potentiel hydrique par le surcreusement des mares afin d'accroître leur fonctionnalité, de permettre une exploitation optimale des parcours de saison des pluies et de décharger les pâturages de saison sèche surexploités aux abords des forages;
- de réorganiser l'espace pastoral en inculquant à nouveaux à ses exploitants la notion de droit coutumier qui jadis avait entraîné la mise en place de pratiques pastorales favorables à la productivité de l'élevage et à l'équilibre de l'écosystème.

REMERCIEMENTS

L'on ne saurait commencer ce travail sans remercier le Ministère de l'éducation et la Direction de la coopération du Canada pour l'octroi de la bourse destinée aux pays francophones sans laquelle cette recherche n'aurait pas eu lieu. Nous remercions particulièrement Madame Yveline Coté, chargée du suivi pédagogique des étudiants de l'INRS, pour sa disponibilité et son assistance.

Nos remerciements sincères sont destinés au directeur de recherche et à Goze Bertin Béné, le co-directeur de cette thèse, à qui revient le mérite de toutes les corrections et conseils apportés dans le but de produire un document de bonne qualité, et à sa gentille petite famille.

À mon mari qui a su être patient tout en souffrant de l'éloignement et de la fatigue causée par les longs trajets entre Québec et Ottawa. À mes parents qui, de loin n'ont jamais cessé de m'apporter leur soutien.

À tout le personnel du Centre de Suivi Écologique de Dakar pour leur bon accueil, les données et le matériel aussi bien de terrain que les ordinateurs qu'ils ont bien voulu mettre à notre disposition dans un cadre d'amitié et de coopération, nous exprimons notre reconnaissance profonde.

Merci à tous les étudiants de l'INRS-Eau dont le soutien moral a créé un cadre favorable à l'achèvement de cette thèse particulièrement Emmanuelle Quentin dont les apports à ce travail sont inestimables. Je n'oublie pas Adama Filli Bousso qui a accepté de partager mes peines pour les travaux de terrain et de me servir d'interprète pour les enquêtes.

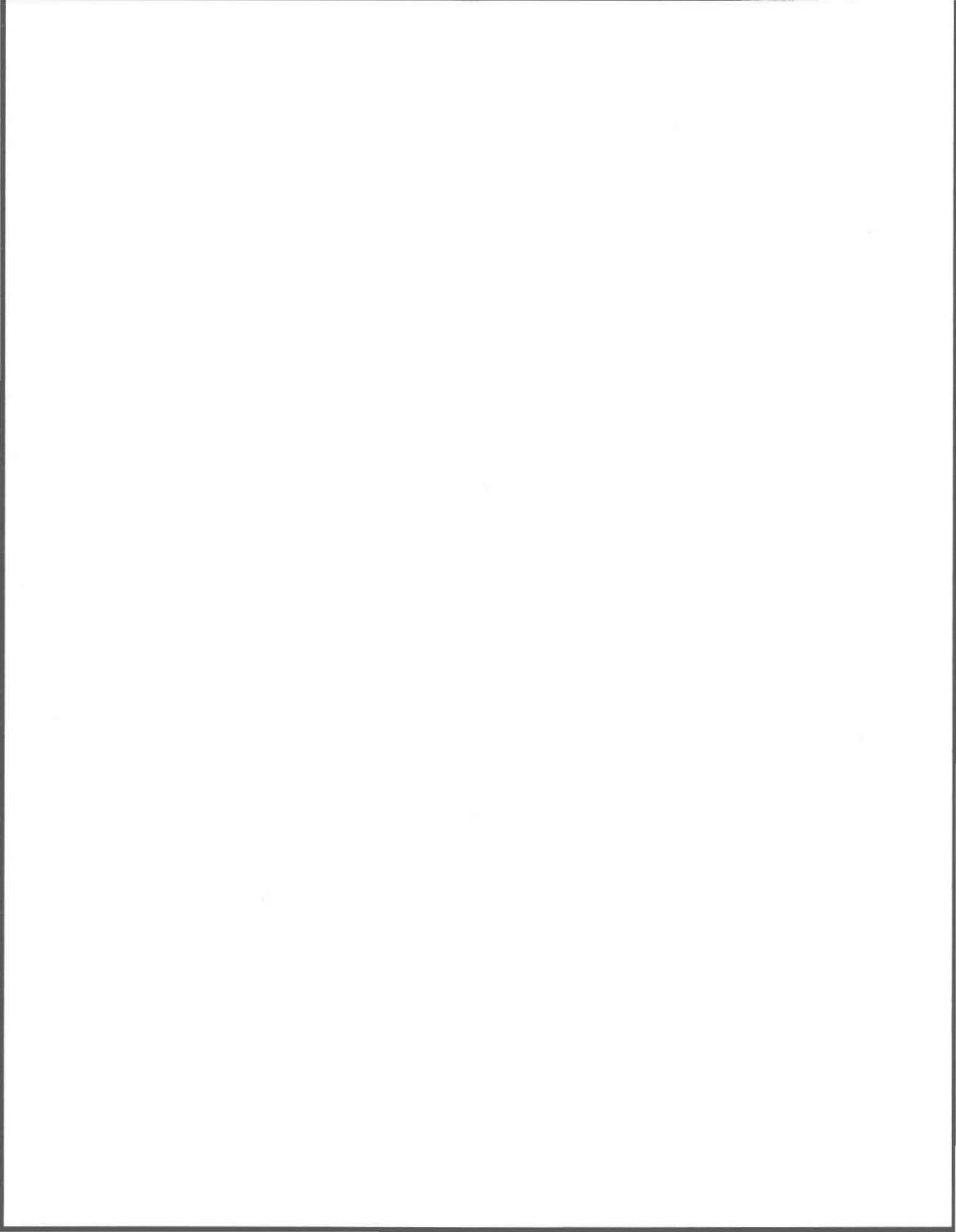


TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xii
1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	2
1.2 Objectifs et contribution originale de l'étude	4
1.2.1 Objectif général	4
1.2.2 Objectifs spécifiques	5
1.2.2.1 Diagnostic du système pastoral à l'aide des données de terrain	5
1.2.2.2 Étude des facteurs socio-économiques	5
1.2.2.3 Intégration des données : cartographie et analyse spatiale	6
1.2.3 Contribution originale de l'étude	6
1.3 Méthodologie globale	7
1.3.1 Indicateurs de système pastoral et critères d'analyse	7
1.3.2 Approche conventionnelle	10
1.3.3 Approche par télédétection et GPS	14
1.3.3.1 Images de télédétection	14
1.3.3.2 Photographies aériennes	17
1.3.3.3 Recensement des mares par GPS	17
1.3.4 : analyse des résultats et synthèse cartographique à l'aide d'un SIG	18
1.3.5 Analyse des résultats et aide à la décision	21
2 ÉTUDE CONVENTIONNELLE DE L'ÉCOSYSTÈME PASTORAL SAHÉLIEN	22
2.1 Généralités	22
2.2 Situation géographique	23
2.3 Influence des facteurs physiques sur l'écosystème pastoral sénégalais	26
2.3.1 Géomorphologie-géologie	26
2.3.2 Pédologie	27
2.3.3 Le climat	29
2.3.3.1 Les précipitations	29
2.3.3.2 Les mouvements saisonniers	31
2.3.3.3 Les mouvements exceptionnels	36
2.3.3.4 Les températures	36
2.3.3.5 L'évaporation	36
2.3.3.6 L'humidité relative	37
2.3.3.7 Les ressources en eau et leurs incidences sur la structuration de l'espace pastoral	37

2.4	Évaluation et exploitation des ressources animales	42
2.5	Évaluation des pâturages	48
2.5.1	Composition floristique	48
2.5.2	Les potentialités fourragères	50
2.5.3	La production végétale	59
2.5.4	Calcul des capacités de charge	59
2.6	Évaluation des ressources hydriques	60
2.6.1	Les forages	60
2.6.2	Les mares	61
2.6.3	Analyse de la qualité des eaux	62
2.6.3.1	Incidences sanitaires de la pollution provenant des animaux à sang chaud	63
2.6.3.2	Contamination des ressources hydrauliques au Sahel	64
2.6.3.3	Indicateurs de pathogénéicité	65
2.6.3.4	Méthodologie d'analyse	66
2.6.3.5	Résultats des analyses de la qualité de l'eau	68
2.7	Étude socio-économique	73
2.7.1	La structuration de l'espace pastoral	73
2.7.2	La modification des pratiques pastorales	73
2.7.3	La mobilité du cheptel	74
2.7.2	Influence des disponibilités hydriques et végétales sur la physiologie du bétail et le rythme d'exploitation des parcours	77
2.7.3	Distribution spatiale des ressources végétales et hydriques	79
3	APPROCHE PAR TÉLÉDÉTECTION	81
3.1	Pourquoi utiliser la télédétection ?	81
3.2	Application de la télédétection au Sahel	81
3.3	Traitement des données de télédétection	82
3.3.1	Intégration des données satellitaires et des données de terrain	82
3.3.2	Calcul des indices de végétation	82
3.3.3	Régression entre l'indice de végétation et la biomasse au sol	83
3.3.4	Élaboration de la carte de biomasse végétale	86
3.3.5	Numérisation des cultures	86
3.3.6	Utilisation de photographies aériennes	86
3.3.7	Recensement des points d'eau par GPS	89
4	LE SIG : ANALYSE SPATIALE ET SYNTHÈSE CARTOGRAPHIQUE	95
4.1	Pourquoi utiliser un SIG ?	95
4.2	Quelques exemples d'utilisation du SIG au Sahel	95
4.3	Analyses spatio-temporelles	96
4.3.1	Création de la base de données	96
4.3.2	Analyse de changements	103
4.3.2.1	Évolution du NDVI entre septembre et avril	103
4.3.2.2	Analyse spatiale	104
4.4	Analyse des résultats et proposition de politique de gestion des parcours	116

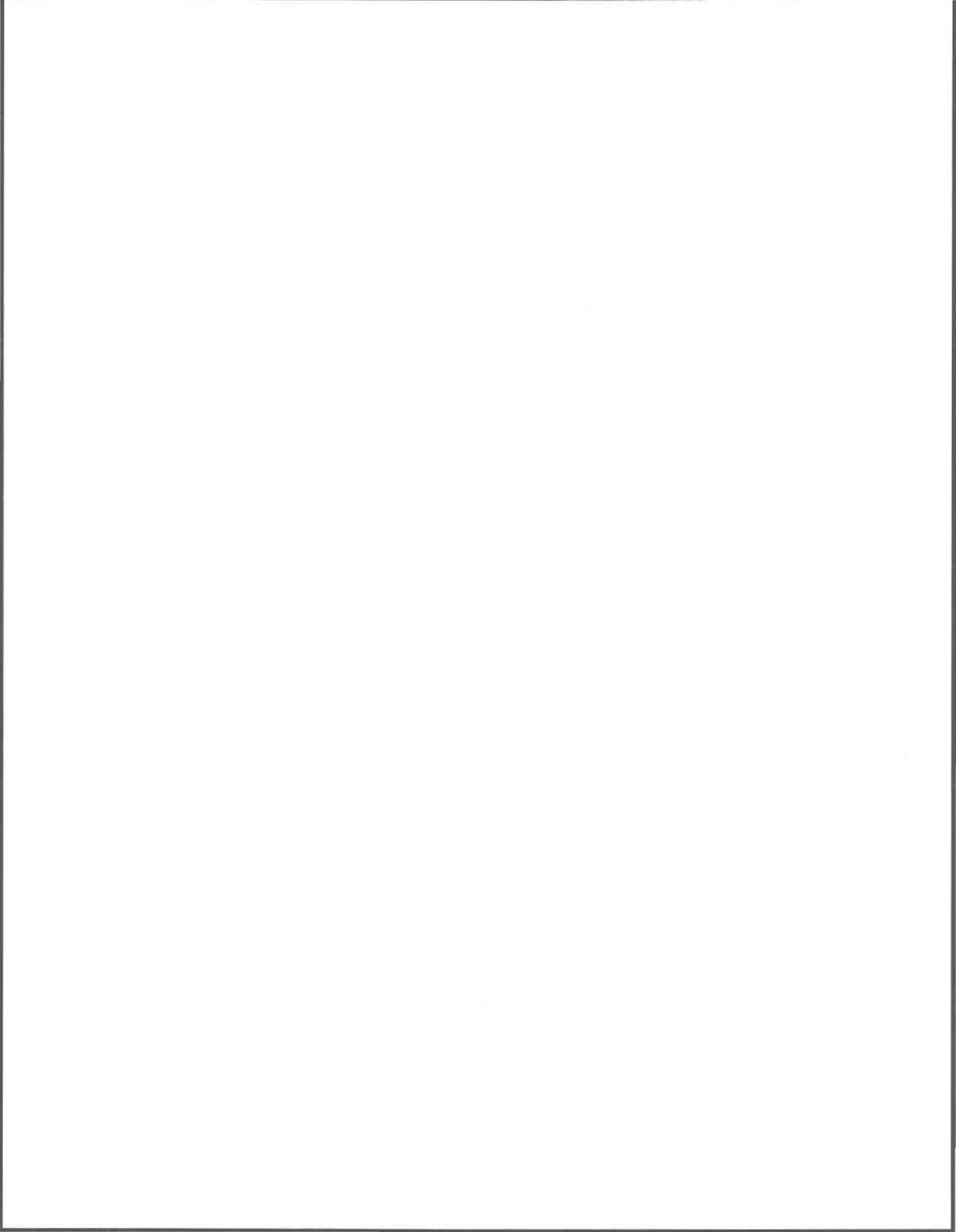
5 CONCLUSION	127
6 LISTE DES RÉFÉRENCES	129

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristique spectrale des bandes du capteur HRV du satellite SPOT . . .	14
Tableau 2 : Forages recensés dans la zone d'étude	41
Tableau 3 : Densités et effectifs des bovins recensés au Sénégal lors des VSR du CSE en 1992.	43
Tableau 4 : Densités et effectifs des petits ruminants recensés au Sénégal lors des VSR du CSE en 1992	44
Tableau 5 : Caractérisation des graines de certaines espèces sahéliennes par leur poids, la dureté, l'hétérogénéité des semences et par la vitesse de la germination	51
Tableau 6 : Classification des espèces suivant leur force de concurrence avec indication des caractères dominants qui déterminent cette force de concurrence	54
Tableau 7 : Normes de calcul des capacités de charge	59
Tableau 8 : Résultat des analyses chimiques de l'eau de forage	69
Tableau 9 : Résultat des analyses chimiques de l'eau de mare	69
Tableau 10 : Résultat des analyses bactériologiques de l'eau de forage	70
Tableau 11 : Résultat des analyses bactériologiques de l'eau de mare	70
Tableau 12 : mares autour du forage de Labgar	90
Tableau 13 : mares autour du forage de Yaré Lao	91
Tableau 14 : mares autour du forage de Namarel	92
Tableau 15 : mares autour du forage de Mbiddi	92
Tableau 16 : Valeurs de friction en saison des pluies	115
Tableau 17 : Valeurs de friction en saison sèche	115

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Composantes méthodologiques du projet de recherche	8
Figure 2 : Composantes de l'approche conventionnelle	11
Figure 3 : Composantes de l'approche par télédétection	15
Figure 4 : Courbe théorique de réflectance d'un végétal	17
Figure 5 : Analyse spatiale et synthèse cartographique	19
Figure 6: Le Ferlo nord du Sénégal	24
Figure 7 : Localisation de la zone d'étude	25
Figure 8: Esquisse pédologique du Nord Sénégal à l'exception des milieux hydromorphes de la vallée du fleuve Sénégal (J. Valenza et A.K Diallo, 1972).	28
Figure 9: Évolution de la pluviométrie dans le département de Podor (1950-1993)	30
Figure 10: Répartition moyenne mensuelle de la pluviométrie et de l'évapotranspiration dans le département de Podor (1971-1993)	30
Figure 11: Transhumances antérieures aux forages dans le ferlo nord (d'après F. Bonnet- Dupeyron - 1952)	32
Figure 12 : Transhumances et déplacements de population en 1957 dans le ferlo nord (d'après Ph. Grenier)	33
Figure 13 : Transhumances en 1982 (d'après H. Barral, 1982)	34
Figure 14: Déplacements saisonniers des troupeaux en fonction des zones écologiques (Centre de Suivi Ecologique, 1991)	35
Figure 15 : Courbes de températures mensuelles en degré Celsius (1971-1993)	38
Figure 16 : Évolution mensuelle de l'humidité relative entre 1971 et 1993	38
Figure 17 : Formations aquifères du Sénégal	40
Figure 18: Évolution du cheptel et de la pluviométrie dans le département de Podor de 1069 à 1985.	46
Figure 19 : Régression entre le NDVI et la biomasse au sol	85
Figure 20 : Carte de biomasse	87
Figure 21 : Carte de localisation des mares	93
Figure 22 : Carte pédologique	99
Figure 23 : Carte topographique	101
Figure 24 : Évolution du NDVI entre septembre et avril	105
Figure 25 : Aire de polarisation des mares	109
Figure 26 : Carte des sites de l'élevage en saison des pluies	111
Figure 27 : Carte des sites de l'élevage en saison sèche	113
Figure 28 : Carte de friction de saison des pluies	117
Figure 29 : Carte de friction de saison sèche	119



1 INTRODUCTION

La partie septentrionale du Sénégal appartient au domaine sahélien, le terme "Sahel" désignant le rivage du désert. Cette zone écologique marquée par une pluviométrie faible (300 à 500 mm par an) et irrégulière, abrite les réserves sylvo-pastorales du pays. L'élevage joue un rôle primordial aux plans économique, social et culturel. Sa contribution au système alimentaire et à la balance commerciale du pays (30% du PIB du secteur rural et 8% du PIB national) en fait une des préoccupations majeures des pouvoirs publics. Le bétail constitue donc au Sénégal une ressource économique essentielle et traduit, en même temps, un mode de vie et un capital pour les populations locales. Pourtant le domaine de l'élevage est loin d'être maîtrisé car cette activité dépend d'un élément vital: **l'eau**.

La péjoration du climat qui a conduit à parler du phénomène de sécheresse et de son corollaire: la désertification, conjuguée aux actions anthropiques (feux de brousse et coupe abusive des arbres), se sont traduites par la raréfaction des ressources naturelles (eau, flore et faune).

Comme partout ailleurs au Sahel, l'élevage sénégalais est soumis à trois contraintes: l'eau, l'alimentation et les maladies. Dans la zone sylvo-pastorale nord, communément appelée le Ferlo, les conditions climatiques ne sont favorables à aucune autre activité économique que l'élevage. C'est l'eau qui façonne le paysage végétal de par la quantité de pluie et sa répartition. Elle détermine pour une large part la quantité et la qualité du fourrage mis à la disposition du bétail. Les ressources hydriques assurent l'abreuvement du bétail et des populations locales, condition *sine qua non* de l'existence et de la pérennité de ces peuples nomades et élément déterminant du capital animal, source de leur bien-être et de leur fierté. Les spectacles désolants de cadavres de bêtes, jonchés sur les sols craquelés des régions sahéliennes en années de sécheresse en témoignent. L'exploitation des ressources hydriques a des conséquences sur le milieu naturel. Ses modalités et le type de gestion des ressources, (particulièrement l'eau et le fourrage), affectent l'équilibre de l'écosystème; Dans un Sahel où la longueur de la saison sèche est la principale contrainte à la gestion des ressources hydriques et fourragères, il importe de déterminer le potentiel disponible et de trouver les

moyens d'une gestion adéquate pour ne pas aggraver l'exploitation excessive des ressources, source de déséquilibre de l'écosystème naturel. L'utilisation des ressources hydriques peut aussi avoir des conséquences sur la santé du bétail et des pasteurs.

Le but de cette étude est de contribuer à la recherche de solutions à la crise pastorale sahélienne dans le ferlo sénégalais. L'utilisation de nouvelles techniques de cartographie et de traitement d'images satellitaires peut aider à étudier le problème de l'eau et à évaluer ses incidences dans la zone sylvo-pastorale sénégalaise, par le biais d'indicateurs et de critères d'analyses définis que sont les facteurs géographiques et socio-économiques. Des données multisources seront combinées pour réaliser l'inventaire et la cartographie des ressources en eau et en fourrage, dans le but de fournir aux décideurs locaux (Etat et bailleurs de fonds) des informations facilitant l'aide à la décision. La recherche se fera à trois niveaux: la cartographie des ressources suite à l'évaluation de l'existant, l'étude socio-économique des pratiques pastorales au Ferlo et enfin l'intégration des différentes données dans un système d'information géographique (SIG) en vue d'améliorer la gestion du système pastoral.

Le présent travail sera donc présenté de la manière suivante: après la définition de la problématique, des objectifs et de la méthodologie qui sera utilisée, nous procéderons à l'étude conventionnelle de la question avant d'aborder l'application de la télédétection et des SIG. Le tout sera couronné d'une conclusion qui consistera en la synthèse des parties précédentes, à l'évaluation des moyens utilisés et à des recommandations pour la gestion future des ressources étudiées.

1.1 Problématique

Dans le Sahel sénégalais, l'élevage revêt un caractère extensif. Le bétail se nourrit de pâturages naturels. Avant les années 50, il existait un équilibre entre la charge animale et la disponibilité du fourrage. Toutefois, suite à l'inexploitation de riches pâturages au cours de la saison sèche qui s'expliquait par le manque d'eau, des forages furent créés. Ces derniers,

en apportant une solution au problème de l'eau, ont entraîné en même temps une fixation plus durable des éleveurs et de leurs troupeaux dans les zones où ils sont implantés. En même temps, les progrès de la médecine vétérinaire qui ont permis l'éradication de plusieurs épidémies animales ont favorisé la multiplication du cheptel dans la zone. Ainsi, l'accroissement de la charge animale combiné aux effets de la sécheresse se sont traduits par une dégradation des écosystèmes pastoraux. Cette dégradation est surtout sensible autour des forages où la végétation ligneuse qui, contribue pour une large part à l'alimentation du bétail au cours de la saison sèche, est coupée de façon anarchique. Cela a entraîné un éclaircissement de la couverture végétale et un changement dans la composition floristique qui se transforme en faveur des espèces les plus résistantes à la sécheresse.

D'autre part, les aménagements hydroagricoles réalisés dans la vallée du fleuve Sénégal ont accéléré la concurrence entre l'agriculture et l'élevage pour l'exploitation des terres et l'accès au fleuve. En plus, l'avancée d'un front agricole du Centre du pays vers le Nord gagne du terrain au détriment de l'espace pastoral. Avant la découverte de la nappe du Maëstrichien en 1930 qui a permis l'implantation des forages, le bétail migrait au cours de la saison sèche vers le fleuve pour s'y abreuver. De nos jours, l'espace pastoral s'est rétréci; confinés dans les terres intérieures du Ferlo, les pasteurs se dirigent vers des régions plus méridionales à la recherche de l'eau, surtout en cas de pannes des forages fréquentes en saison sèche, et à la poursuite d'un fourrage qui n'est pas toujours de meilleure qualité

Devant cette extension spatiale de l'espace agricole et la désertisation qu'implique le phénomène de sédentarisation au cours de la saison sèche autour des points d'eau dont la fonctionnalité n'est pas toujours assurée, l'élevage perd sa valeur. Les phénomènes d'exode rural des jeunes pasteurs en sont les conséquences.

Cette situation est aggravée par la méconnaissance des ressources disponibles qui empêche l'intervention effective des décideurs locaux dans un secteur où seules la surveillance et la gestion rationnelle des ressources permettent d'éviter les crises environnementales.

Les ressources hydriques sont constituées par les points d'eau permanents (forage, puits, céanes) de la longue saison sèche (9 mois) alors que les mares temporaires de la saison des pluies assurent la relève. Ces mares sont utilisées aussi bien par le bétail que par les populations locales (alimentation et besoins domestiques). La manifestation des maladies d'origine hydrique, surtout par les affections diarrhéiques fréquentes et causes de mortalité, nécessite de tirer sur la sonnette d'alarme.

La principale difficulté qui se pose à la gestion des espaces sylvo-pastoraux dans les pays sahéliens est la méconnaissance des ressources disponibles. Les informations sont compilées dans des cartes sommaires dont la mise à jour fait défaut et font référence plus aux formations végétales qu'à la production. Les points d'eau ne sont pas répertoriés. Il apparaît évident que toute étude du système pastoral doit cerner l'utilisation des ressources végétales et hydriques et leur évaluation en termes de quantité et de qualité. Seule la connaissance du potentiel disponible et des techniques de gestion adoptées par les pasteurs peut nous aider à analyser la crise pastorale et à y apporter des solutions. Toutefois, dans le cadre de cette étude, contrairement à l'approche traditionnelle qui se limitait à utiliser des données de terrain pour estimer la production végétale ou à esquisser sommairement les plans d'eau à partir des renseignements fournis par les populations locales, les technologies modernes sont mises à contribution pour aider à l'analyse du problème et à visualiser les avenues de solution.

1.2 Objectifs et contribution originale de l'étude

1.2.1 Objectif général

Ce projet a pour finalité de proposer des voies de solution aux problèmes liés à la gestion des parcours dans le Ferlo sénégalais. Pour atteindre cette finalité, il s'appuie sur l'étude des parcours naturels et de leurs utilisations en fonction de la disponibilité de l'eau et du foin et sur l'analyse de la qualité des eaux résultant de la concentration du bétail autour des points d'eau. Il s'agit de créer un mode d'exploitation du milieu qui puisse s'inspirer de la pratique

des pasteurs. Tout en maintenant les troupeaux dans leurs transhumances saisonnières qui ont toujours représenté une forme d'adaptation aux conditions du milieu, ce type de gestion des ressources devrait permettre de satisfaire à la fois l'alimentation du cheptel et l'équilibre de l'écosystème.

1.2.2 Objectifs spécifiques

Le projet vise trois objectifs spécifiques relatifs aux moyens utilisés pour résoudre les problèmes inhérents aux pratiques pastorales du Ferlo: le diagnostic du système pastoral à l'aide des données de terrain, l'étude des pratiques pastorales par le biais des facteurs socio-économiques et la cartographie et l'analyse spatiale des ressources par la géomatique.

1.2.2.1 Diagnostic du système pastoral à l'aide des données de terrain

L'analyse détaillée et actualisée des facteurs physiques de la région d'étude de même que celle de son potentiel animal en vue de définir leurs implications sur l'utilisation des parcours permettront :

- d'évaluer les incidences des facteurs géographiques sur la disponibilité des ressources végétales, hydriques et animales dont l'exploitation détermine la structuration de l'espace pastoral;
- d'estimer la productivité du milieu du point de vue de la composition floristique, des potentialités fourragères et de la production végétale;
- de réaliser l'inventaire des points d'eau, leur identification et la définition de leurs fonctions par enquête auprès des populations locales;
- d'analyser sur le terrain et au laboratoire la qualité chimique et bactériologique des eaux.

1.2.2.2 Étude des facteurs socio-économiques

Le projet se base sur l'étude socio-économique de la région en vue de comprendre le système de gestion des parcours naturels, la structuration ancienne et actuelle de l'espace pastoral, les pratiques pastorales et leur évolution, la dynamique saisonnière et annuelle du bétail et des

pasteurs dans la recherche de l'eau et du fourrage. Cette étude permettra aussi d'évaluer la conduite du troupeau et de trouver des facteurs d'optimisation de l'alimentation du bétail et de la gestion de l'eau.

1.2.2.3 Intégration des données : cartographie et analyse spatiale

La cartographie de l'utilisation du sol et de l'habitat à l'aide de photographies aériennes, d'images satellites et d'un GPS offre un support numérique de base de données qui seront combinées dans ce SIG et, en se servant des résultats d'enquêtes socio-économiques, les parcours du bétail seront évalués. Cette intégration permettra de suggérer des parcours pertinents ayant le moins d'impact sur l'environnement.

1.2.3 Contribution originale de l'étude

L'originalité de cette recherche réside dans l'approche du phénomène étudié. L'évaluation des ressources se fait par la méthode conventionnelle d'étude des facteurs géographiques et socio-économiques et de leurs influences sur la disponibilité de ces ressources. La méthodologie utilisée dans ce cas est l'échantillonnage sur le terrain des espèces végétales et les enquêtes menées auprès des populations locales sur le système de gestion des ressources. Mais, à cela s'ajoute une nouvelle approche plus moderne qui est : l'estimation et la cartographie de la production végétale par la télédétection, les analyses de la qualité de l'eau qui représentent une nouveauté dans le secteur de même que la cartographie des points d'eau dont les coordonnées géographiques sont enregistrées à l'aide d'un système de positionnement par satellite (GPS ou global position system) et saisies dans un SIG. Ce dernier permet également de cartographier le sol et le relief sous un format numérique. L'analyse conventionnelle combinée à l'utilisation de nouvelles technologies de la géomatique vise l'amélioration de la gestion des parcours naturels par la définition d'itinéraires permettant l'exploitation optimale et simultanée des ressources et la sauvegarde de l'environnement. C'est cette combinaison d'outils et de méthodes, classiques par eux-mêmes, mais utilisés pour appréhender une problématique spécifique dans un contexte géographique particulier, qui constitue l'originalité du travail.

1.3 Méthodologie globale

L'étude se réalisera selon le plan suivant (figure 1):

- une approche conventionnelle afin de définir l'influence des facteurs physiques et socio-économiques sur les ressources naturelles et sur le capital animal et l'évaluation des ressources végétales et hydriques par le traitement des données de terrain;
- une approche par la télédétection qui traite de l'exploitation d'images satellitaires, de photographies aériennes et de données GPS;
- un volet SIG qui procède à l'intégration des informations obtenues dans les deux premiers points avec des données auxiliaires *in situ* en vue de procéder à l'analyse spatiale du phénomène étudié;

Une analyse des résultats obtenus devant aboutir à une aide à la décision.

Cette méthodologie globale comprend plusieurs étapes: la définition d'indicateurs et de critères d'analyse du système pastoral qui est l'approche utilisée de nos jours par les chercheurs du monde sahélien, l'analyse de ce système par la méthode conventionnelle, l'utilisation de la télédétection et du GPS, enfin la cartographie et l'analyse spatiale à l'aide d'un SIG.

1.3.1 Indicateurs de système pastoral et critères d'analyse

Le diagnostic de l'écosystème pastoral sahélien passe irrévocablement par l'évaluation des facteurs géographiques (physiques, climatiques et biogéographiques) et socio-économiques régissant l'organisation de ce milieu. La connaissance des ressources naturelles et de leurs caractéristiques constitue un préalable à toute tentative de gestion des parcours naturels du Ferlo.

C'est d'abord la nature du terrain qui détermine le potentiel de ressources mises à la disposition des populations. Dans le cadre du domaine pastoral, la géomorphologie et la pédologie définissent la richesse du sol, sa profondeur et la topographie; autant de variables

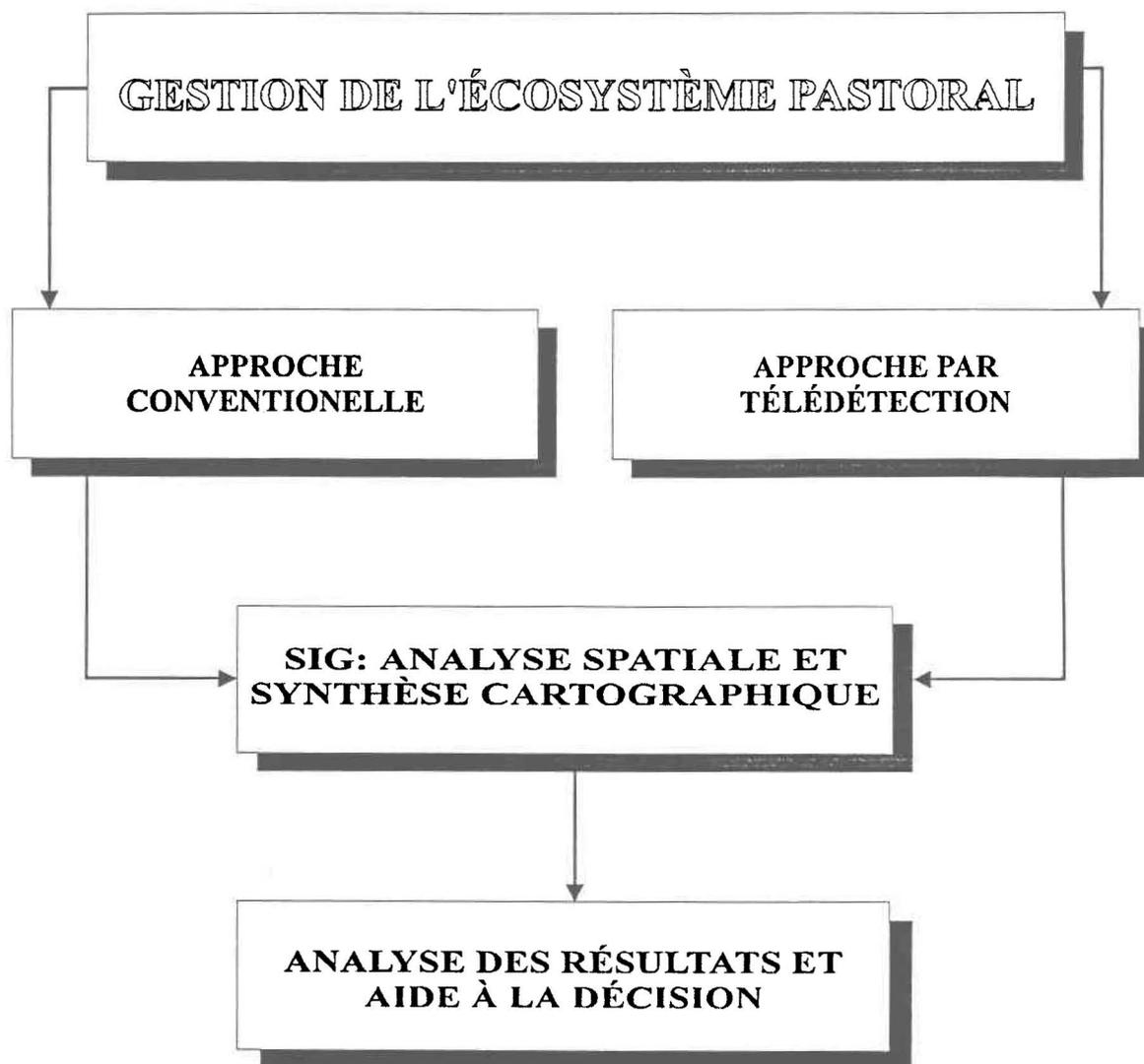


Figure 1 : Composantes méthodologiques du projet de recherche

qui donnent à la région son cachet pastoral. En fonction du drainage, le sol est un réceptacle de l'eau de pluie, origine des mares superficielles ou sources d'alimentation des réserves aquifères plus profondes des forages. De tous les facteurs climatiques, la pluviométrie est le plus déterminant dans le cadre de l'écosystème pastoral. Elle détermine le potentiel hydrique et fourrager en terme de qualité et de quantité. La répartition spatiale, la densité et la dynamique saisonnière et annuelle de la végétation sont largement tributaires de la pluie. La connaissance des ressources hydriques est primordiale; elles sont, avec le fourrage, les deux éléments fondamentaux de l'élevage.

Trois critères servent à évaluer la qualité du fourrage: la composition floristique, la valeur fourragère et la production. Celle de l'eau est estimée selon des normes définies par l'utilisation d'indicateurs de pathogénéicité: les coliformes et les streptocoques. La présence d'un coliforme fécal dans 100 ml d'eau ou d'un streptocoque dans 50 ml atteste de sa pollution bactériologique. De même, quand on décèle dans l'eau un taux d'ammonium supérieur à 0,005 mg/l, cela est significatif d'une pollution chimique.

L'organisation socio-économique du domaine pastoral, par le biais de règlements relatifs à la gestion de l'espace et par les pratiques pastorales, est un bon indicateur de la réussite de l'élevage. C'est un critère qui permet d'appréhender la rationalité de l'éleveur dans l'exercice de cette activité, rationalité visant l'assurance de l'alimentation et l'abreuvement du bétail mais aussi la prise en considération des conséquences de la dynamique pastorale sur l'écosystème.

La démarche à suivre consiste à intégrer des données obtenues par une méthode conventionnelle (revue littéraire, enquêtes, échantillonnages et analyses de l'eau), qui représente des techniques fréquemment utilisées dans les études de pâturages et le suivi de la qualité des eaux d'alimentation, avec des données de géomatique provenant d'une technologie moderne. Celles-ci permettront de disposer d'un support numérique et cartographique plus facilement manipulable par les utilisateurs.

1.3.2 Approche conventionnelle

Elle regroupe plusieurs composantes d'ordre physique, technique et socio-économique. (figure 2).

Étude des facteurs physiques

L'évaluation des influences des facteurs physiques sur la disponibilité des ressources se fait à partir des données géomorphologiques, pédologiques et hydrologiques fournies par la littérature. Les relevés climatiques proviennent de la station pluviométrique locale. Les ressources animales sont estimées par le Centre de Suivi Écologique (CSE) au moyen de Vols systématiques de Reconnaissance (VSR).

Échantillonnage de la végétation

Un protocole de recherche a été mis en place afin de procéder à l'échantillonnage de la végétation pour l'inventaire des espèces ligneuses et herbacées et le calcul de la production végétale par des mesures directes sur le terrain. Celles-ci permettront de valider l'information satellitaire. Pour cela, des sites d'échantillonnage d'une superficie de 1200 m² correspondant à six pixels de l'image SPOT ont été mis en place afin de procéder à une mesure directe de la production ligneuse et herbacée. Le choix de ces sites est effectué à partir des photographies aériennes. La photo-interprétation a permis de définir les unités pédologiques existantes suivant leurs textures et leur couleur. Les types de sols sont définis en utilisant la carte des pâturages où ils sont représentés. Sur chaque unité pédologique, des sites d'échantillonnage sont localisés afin d'avoir une idée de la distribution des espèces végétales suivant le type de sol. L'identification des espèces végétales donne une idée de la qualité et des types de parcours.

Mesure de la biomasse foliaire des ligneux

La mesure de la production foliaire des ligneux est effectuée au niveau de chaque site. Les paramètres suivants sont relevés : le nom de l'espèce, la hauteur de l'arbre et la circonférence du tronc. La production foliaire est calculée par la méthode du Centre International pour

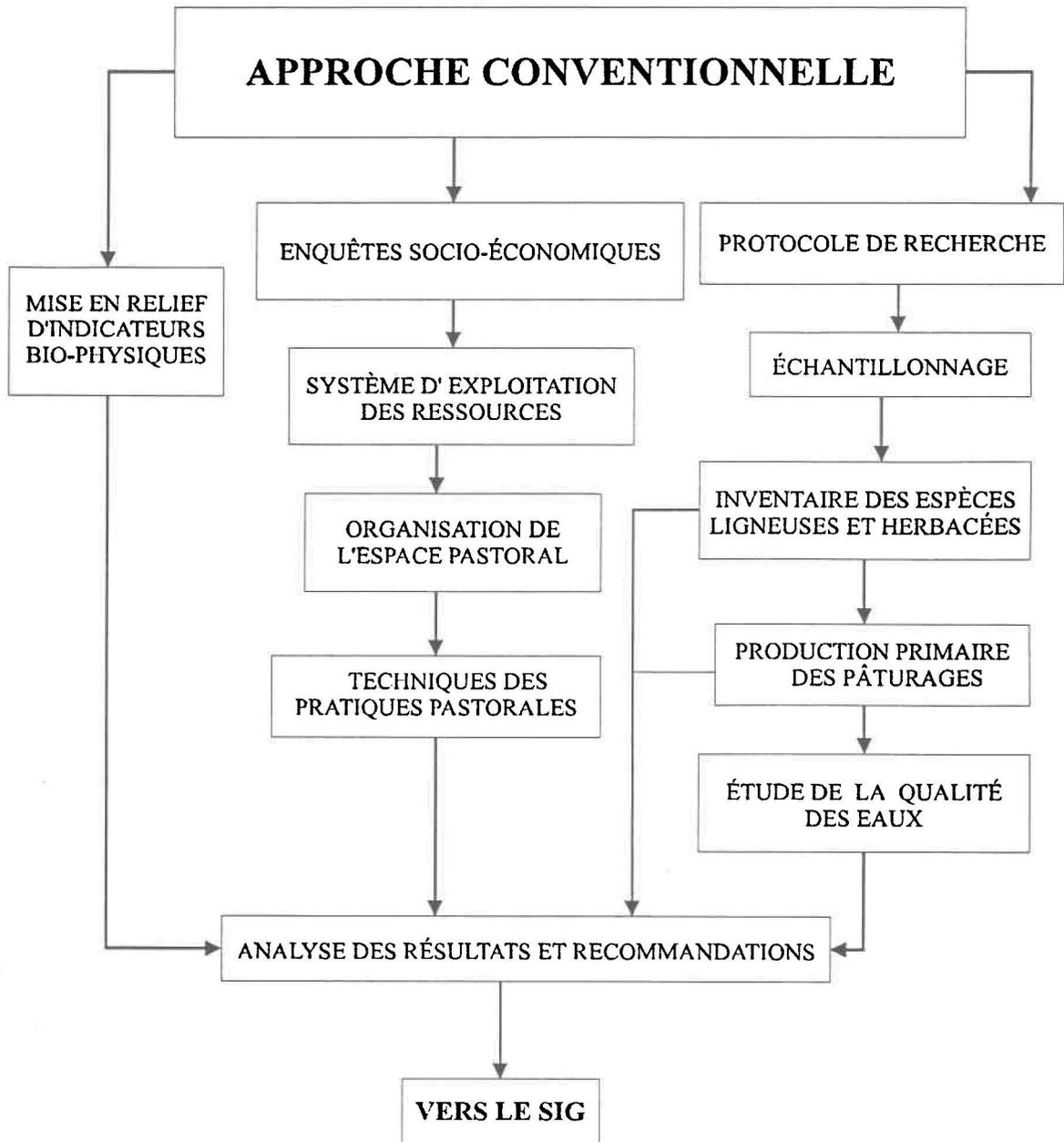


Figure 2 : Composantes de l'approche conventionnelle

l'Élevage en Afrique (CIPEA) développée au Mali par Hiernaux et Diarra (Cissé, 1980). C'est une relation allométrique établie pour la plupart des espèces ligneuses sahéliennes qui met en relation la production foliaire annuelle d'un arbre et la circonférence de son tronc. Elle est du type:

$$P = a \cdot C^b \text{ avec}$$

a = constante fonction de l'espèce

C = circonférence du tronc en cm

b = constante, fonction de l'espèce

Les variations intra et interannuelles dans la production des arbres, dues à des différences biologiques et édaphiques et à la répartition des pluies, sont atténuées par un système de calibrage. Il consiste à multiplier la production de matière verte des espèces les plus représentatives de chaque site par le rapport du poids sec moyen d'une branchette sur le poids standard déjà établi de la branchette.

Mesure de la production herbacée

La mesure de la production herbacée se fait suivant la méthode de la ligne d'échantillonnage stratifiée, inspirée de celle utilisée par le CIPEA. Le long d'un transect de 85 m correspondant à la diagonale de chaque site, des échantillons d'un mètre carré sont prélevés au hasard. Auparavant, une stratification du transect en différents niveaux de production allant de 0 à 3 a déjà été effectuée:

- 0 correspond au sol nu
- 1 correspond à une production relativement faible
- 2 correspond à une production moyenne
- 3 correspond à la production la plus élevée sur le site.

Évidemment les niveaux 1, 2, et 3 varient d'une zone écologique homogène à une autre. Une partie de la matière végétale verte prélevée sur ces placeaux est transportée à l'étuve après un rééchantillonnage effectué pour chaque niveau de production afin d'obtenir le taux de matière sèche. La production obtenue est pondérée par la fréquence relative de chaque niveau de production.

Analyse de la qualité des eaux

Ces mesures ont été faites au laboratoire et sur le terrain, à l'aide de trousseaux et d'un matériel portatif de filtrage et d'incubation. Les analyses chimiques ont consisté à mesurer le taux de phosphore et d'azote ammoniacal qui sont des indicateurs de la présence de fèces. Elles ont été complétées par la bactériologie notamment la recherche de coliformes et de streptocoques.

Enquêtes socio-économiques

Des enquêtes socio-économiques ont été réalisées à l'aide de questionnaires au niveau des villages et campements situés dans l'aire de desserte des forages de la zone d'étude. Elles ont eu lieu dans 90 % de ces habitations où une entrevue a été tenue avec le chef du campement ou les personnes chargées de la conduite du bétail. Elles avaient pour but de cerner le système d'exploitation des ressources naturelles afin de mieux comprendre la dynamique des populations et du bétail et de surcroît celle du milieu. Elles se sont déroulées en saison des pluies. À l'aide d'un interprète, les questionnaires préparés avant la visite sur le terrain sont remplis par l'enquêteur sur place. Chaque questionnaire comprenait trois parties : la gestion des aires de parcours et des mares, le gardiennage et le déplacement du bétail.

La prise en compte de l'organisation de l'espace pastoral et des pratiques doit aboutir à des propositions de gestion améliorée du système pastoral puisqu'elle permet de saisir la logique qui détermine les choix faits par les éleveurs dans l'utilisation de l'espace. Ceux-ci sont retracés à travers les rythmes de déplacement du troupeau.

1.3.3 Approche par télédétection et GPS

Cette approche consiste à utiliser des données provenant du satellite, de photographies aériennes, et de GPS (figure 3) pour cartographier les points d'eau, la production végétale, les champs, l'habitat, la pédologie et la topographie.

1.3.3.1 Images de télédétection

Des images SPOT panchromatiques et multispectrales, acquises durant la saison des pluies (septembre 93) et la saison sèche (avril 94) sont utilisées comme intrants dans la conception de la base de données. Le satellite SPOT opère dans le visible et l'infrarouge comme le montre le tableau suivant :

Bande spectrale	Domaine spectral (micron)	Résolution
P	0,51 - 0,73	10
XS1	0,50 - 0,59	20
XS2	0,61 - 0,68	20
XS3	0,79 - 0,89	20

Tableau 1 : Caractéristique spectrale des bandes du capteur HRV du satellite SPOT

Pré-traitement

Le pré-traitement comporte des opérations de correction : les erreurs dues aux mouvements de la terre, à des variations d'attitude (angle de visée) ou d'altitude du satellite appellent des corrections géométriques. Celles-ci ont été faites en utilisant les coordonnées de points repérables sur le terrain prises à l'aide d'un système de positionnement par satellite (GPS) selon la grille de projection cartographique U.T.M. Pour les erreurs relevant des instruments de mesure du satellite (temps de réponse du capteur, parasites de transmission, etc), on effectue une correction radiométrique au niveau des valeurs de rayonnement. Celle-ci transforme les niveaux de gris de l'image brute codés de 0 à 255 en réflectance apparente au capteur à l'aide des valeurs de calibration de l'image.

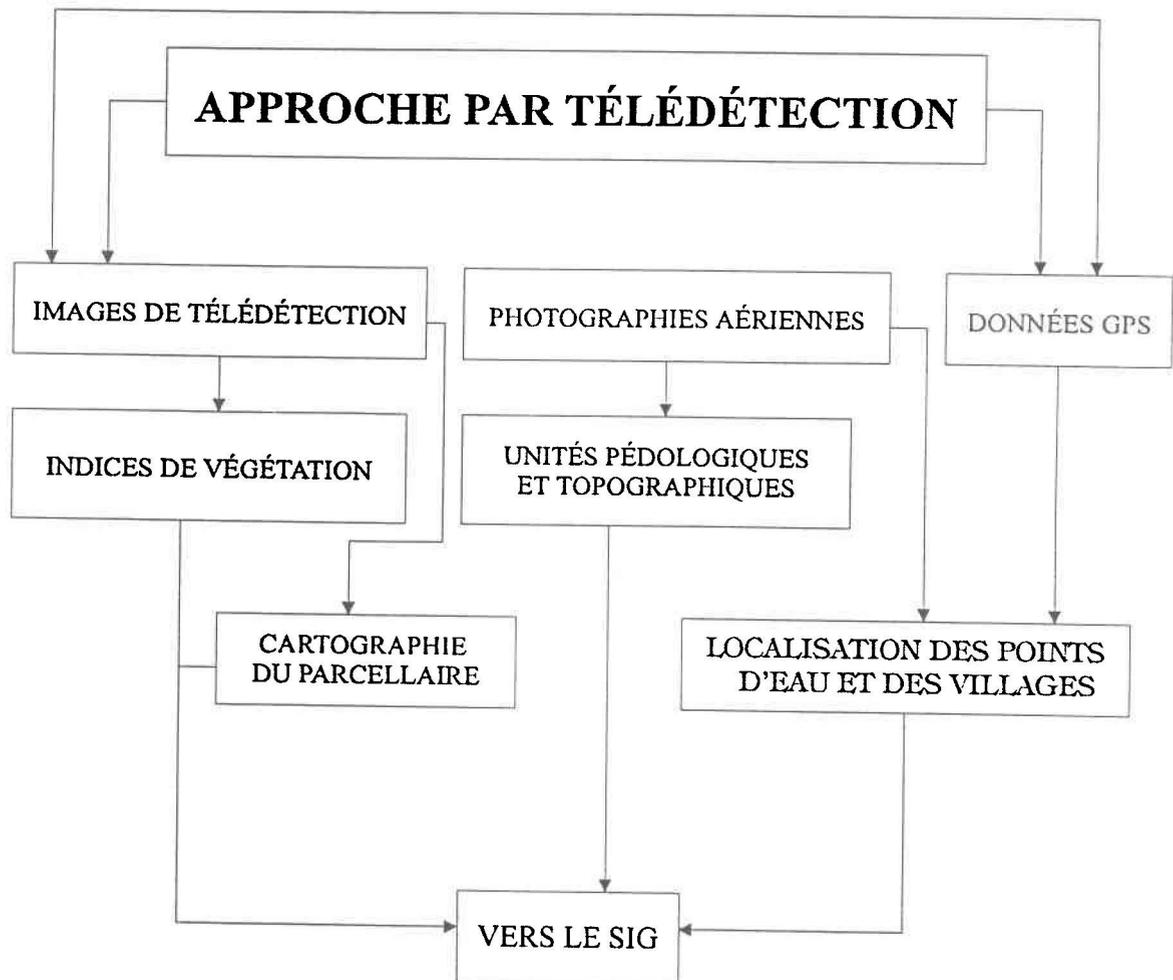


Figure 3 : Composantes de l'approche par télédétection

Intégration du mode panchromatique au mode multibande

Les images XS ont été rééchantillonnées à 10 m afin d'intégrer les deux modes d'acquisition SPOT. L'image produite possède la résolution panchromatique tout en gardant la qualité spectrale du multibande.

Le prétraitement et l'intégration des deux modes panchromatique et multibande ont été faits directement par la compagnie qui a fourni les images satellitaires (Swedish Space Corporation, Satellitbid).

Traitement des données de télédétection

L'image SPOT panchromatique prise en saison des pluies facilite la cartographie des mares les plus importantes. L'exploitation de l'image multispectrale permet d'établir la carte d'indice de végétation et de numériser les cultures. La réflectance des plantes vertes dépend de l'absorption par la chlorophylle du rayonnement électromagnétique. Celle-ci se fait seulement dans le visible pour les longueurs d'onde comprises entre 0,4 μm et 0,7 μm , le maximum d'absorption se passant entre 0,43 et 0,65 μm c'est à dire dans le bleu et le rouge.

Le rapport entre la basse réflectance entre 0,6-0,7 μm (rouge) et la haute réflectance entre 0,75-0,61 μm (proche infra-rouge) (figure 4) est un bon indicateur de l'indice foliaire (Leaf Area Index ou L.A.I.) et de la biomasse photosynthétiquement active (Tucker, 1979). L'indice idéal devrait être particulièrement sensible au couvert végétal, insensible aux effets de sol et peu affecté par les effets atmosphériques (Bariou *et al.*, 1985; Girard, 1975 et 1989; Guyot, 1984 et 1989; Major, 1990; Richardson, 1977; Elvidge et Lyon, 1984). Plusieurs indices ont été développés (Tucker, 1979, 1983, 1985). L'un des plus utilisés est l'Indice de Végétation par la Différence Normalisée (NDVI). Il se calcule par le rapport des canaux rouge et infra-rouge : $\text{PIR} - \text{R} / \text{PIR} + \text{R}$ (Groten, 1993). L'indice de végétation a été calculé en utilisant le système de traitement d'image EASI/SPACE (PCI, inc).

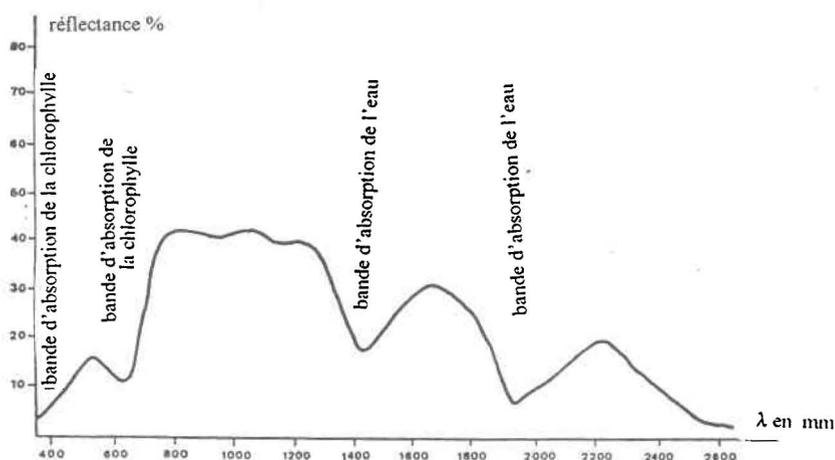


Figure 4 : Courbe théorique de réflectance d'un végétal
(d'après L.A.R.S., 1968 in Bariou *et al.*, 1985)

Cette couverture a permis aussi de cartographier les types de sols, les unités topographiques, les villages et les campements à l'aide de ARC INFO (Environmental Systems Research Institute). Elle a beaucoup aidé dans le choix des sites d'échantillonnage qui s'est fait selon les unités pédologiques.

1.3.3.3 Recensement des mares par GPS

Ces points d'eau sont souvent de dimensions modestes et peu profonds. Seuls ceux qui ont une superficie au moins égale à la taille du pixel, figurent sur l'image satellite. De plus les mares étant constituées d'une eau trouble et boueuse à cause de leur localisation dans des dépressions argileuses et de la présence de fèces, leur identification par télédétection est difficile. En effet, elles peuvent se confondre avec le sol nu environnant. Quelquefois la présence de la végétation rend difficile leur classification, leurs signatures spectrales se confondant avec celles des végétaux localisés dans les dépressions.

Aussi un système de positionnement global par satellite (GPS) fut utilisé sur le terrain pour déterminer leurs coordonnées géographiques et UTM de même que celles des villages

une superficie au moins égale à la taille du pixel figurent sur l'image satellite. De plus les mares étant constituées d'une eau trouble et boueuse à cause de leur localisation dans des dépressions argileuses et de la présence de fèces, leur identification par télédétection est difficile. En effet, elles peuvent se confondre avec le sol nu environnant. Quelquefois la présence de la végétation rend difficile leur classification, leurs signatures spectrales se confondant avec celles des végétaux localisés dans les dépressions.

Aussi un système de positionnement global par satellite (GPS) a été utilisé sur le terrain pour déterminer leurs coordonnées géographiques et UTM de même que celles des villages environnants, afin de les insérer dans le SIG pour pouvoir procéder à leur cartographie. C'est un système de marque "trimble navigation pathfinder basic plus"; il peut capter jusqu'à six satellites avec une erreur d'environ 100 m et une précision de l'ordre de six décimales. Les mesures prises ont été corrigées au Centre de Suivi Écologique (CSE) par la méthode différentielle. Après correction, l'erreur est de plus ou moins 15 m. La localisation des mares et des villages est basée sur leur identification sur les photographies aériennes et les enquêtes effectuées auprès des populations locales ont permis de retrouver leur toponymie.

1.3.4 : analyse des résultats et synthèse cartographique à l'aide d'un SIG

La dernière étape de la méthodologie consiste à saisir les données précédentes et à les intégrer dans le SIG en vue de procéder à l'analyse spatiale du phénomène étudié (figure 5).

Les données à traiter provenant de sources différentes, elles nécessitent l'utilisation d'un outil de stockage, de gestion et d'analyse. Le phénomène étudié variant dans l'espace, il importe de le restituer sous forme cartographique. L'objectif de cette intégration est de voir :

- a) comment les ressources naturelles sont distribuées dans l'espace,
- b) comment les ressources végétales sont réparties par rapport aux ressources hydriques et

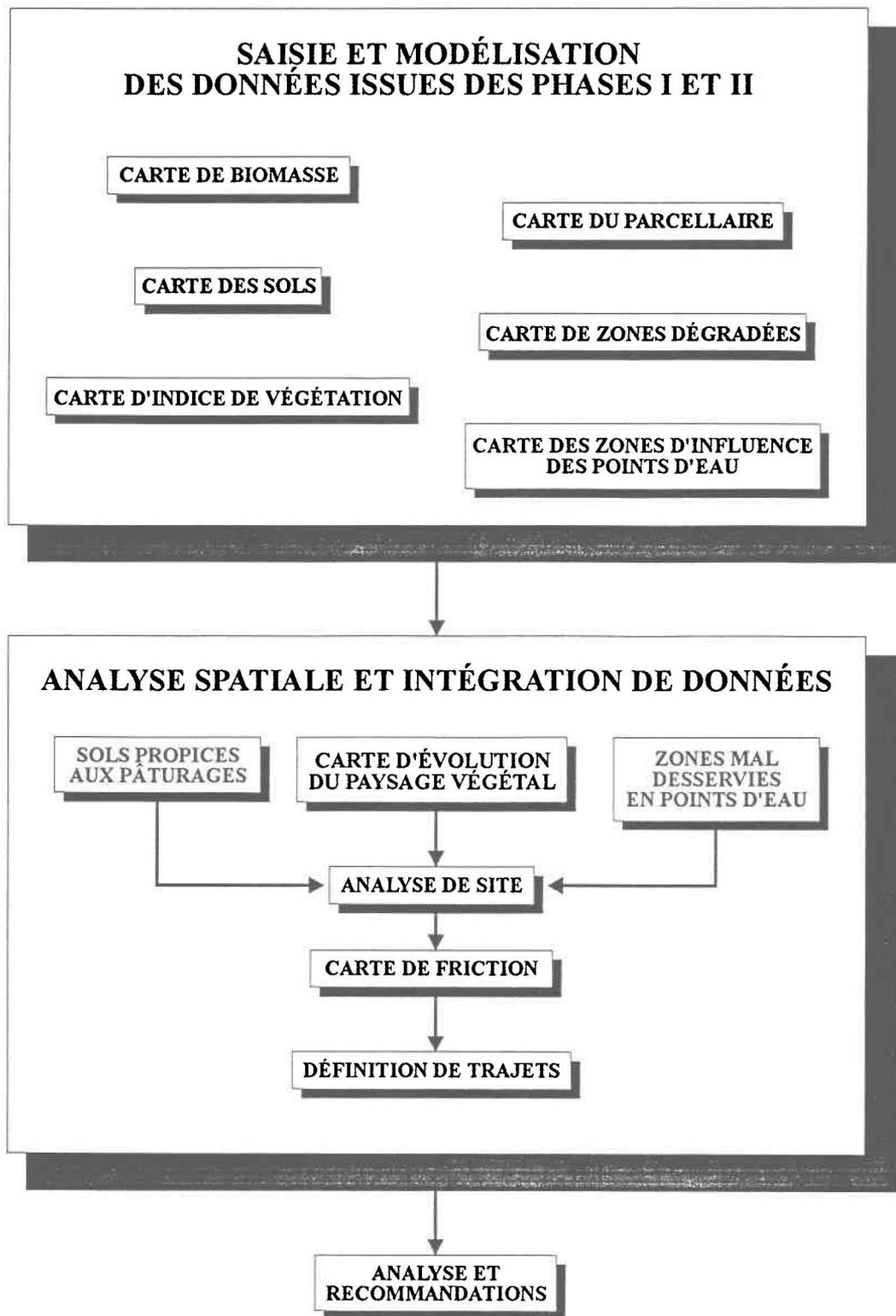


Figure 5 : Analyse spatiale et synthèse cartographique

enfin

c) quel est l'effet de l'utilisation de l'eau sur les parcours naturels.

En d'autres termes, cette section analyse l'évolution du paysage en fonction de l'exploitation des ressources hydriques et selon les saisons afin de définir des trajets pour le bétail qui minimiseront l'influence de la pression animale sur l'environnement.

Pour ce faire, les cartes produites à partir de l'imagerie satellite ou numérisées à partir de données de terrain feront l'objet d'une reclassification dans IDRISI (Clark University) afin de sélectionner l'information qui sera utilisée dans l'intégration cartographique.

Quatre cartes de base sont retenues :

- la carte de biomasse d'où sont extraites les zones pourvues de fourrage,
- la carte des mares de la saison des pluies où sont sélectionnées les aires de polarisation de ces points d'eau,
- celle des forages et de leurs zones d'influence,
- la carte des sols où sont représentés les sols propices aux pâturages.

L'analyse spatiale des données se fait en deux étapes :

- la première étape consiste à faire une identification des sites favorables: le but de cette identification est de déterminer les zones favorables à l'accueil des pasteurs et de leurs troupeaux suivant la disponibilité de l'eau et du fourrage. Elle consiste à rechercher sur une ou plusieurs cartes des zones satisfaisant à un certain nombre de critères définis par l'utilisateur. A l'aide d'opérations de type booléen, on procède à l'interrogation de la base de données pour extraire les informations désirées. Celles-ci peuvent être combinées en utilisant des opérateurs mathématiques ou logiques pour produire une carte de site.
- la deuxième étape concerne la définition des trajets du bétail. Le trajet optimal est calculé

en tenant compte de la présence de l'eau, du fourrage et de la distance minimale à parcourir entre le campement et le point d'eau en évitant les cultures et les zones dégradées sensibles au surpâturage et de valeur fourragère moindre. Pour ce faire, les différentes composantes du milieu sont associées à des poids. Celles qui satisfont à l'exploitation des parcours (eau et fourrage) reçoivent la valeur de référence 1. D'autres, comme les cultures de saison des pluies, du fait qu'elles représentent des barrières au passage du troupeau, sont hautement pondérées. Le logiciel nous fournit des algorithmes de calcul de la distance des trajets du bétail qui tiennent compte de la pondération établie. L'élaboration des trajets se fait suivant le point de départ et le point d'arrivée. En saison des pluies par exemple le troupeau part du campement pour aller à la mare s'abreuver tout en exploitant le fourrage environnant.

1.3.5 Analyse des résultats et aide à la décision

Le but ultime de l'intégration des différentes données est de les analyser du point de vue de leur impact environnemental et de proposer des solutions à une meilleure gestion des parcours. Celle-ci tiendra compte de la productivité du milieu, du potentiel hydrique et des pratiques pastorales.

2 ÉTUDE CONVENTIONNELLE DE L'ÉCOSYSTÈME PASTORAL SAHÉLIEN

En raison de l'objectif visé et du nombre de critères utilisés dans cette approche, ce chapitre constitue la partie majeure de l'étude. Après la revue littéraire, l'influence des facteurs physiques sur la disponibilité des ressources naturelles est analysée, avant que ne soit abordée l'évaluation quantitative et qualitative du capital animal, végétal et hydrique. Enfin l'exploitation des ressources est évaluée à travers l'étude socio-économique. Chaque critère sera décrit et analysé en fonction de son implication dans la disponibilité, la valeur et le type de gestion qu'il implique.

2.1 Généralités

Jusqu'ici, l'évaluation des ressources naturelles du Ferlo s'est faite de manière sporadique à travers certes, de nombreuses publications basées sur des inventaires de végétation ligneuse et herbacée. L'essentiel de ces travaux est basé sur des techniques d'échantillonnage effectuées sur le terrain. Les résultats de ces recherches ont permis d'avoir une bonne connaissance de la composition floristique et de suivre l'évolution de la couverture végétale, surtout en années de sécheresse (Touré, 1986; Grousis, 1988; Poupon, 1980; Bille, 1972; DADS, 1986). Toutefois, les travaux d'inventaire des ressources naturelles ont été presque tous orientés dans le domaine des disponibilités fourragères sans intégrer la dimension eau; or il est difficile de concevoir l'élevage sans la conjonction de ces deux éléments. Les seuls documents publiés sur l'évaluation et la gestion des ressources hydriques consistent en des études très localisées, avec des cartes sommaires de points d'eau basées sur une enquête auprès des populations locales (Diop, 1984 et 1987; MPND, 1987). Aucune de ces études n'a cependant englobé l'aspect touchant la qualité de l'eau; il est vrai que les recherches dans le domaine de l'environnement ne sont encore qu'au stade gestatif dans les pays sahéliens. L'étude socio-économique du Ferlo a été réalisée par plusieurs auteurs dans le but de cerner la gestion des ressources naturelles en vue de l'intensification de la production laitière et de la commercialisation de la viande (Diallo, 1983; Sissokho, 1985; SODESP, 1984). Quelques auteurs se sont penchés sur l'impact des pratiques pastorales sur l'évolution du milieu naturel. Tout cela démontre le manque de synthèse entre les aspects physiques (disponibilité et qualité des ressources) et humains du problème; d'où le but de notre recherche de viser une étude

globale et intégrée de tous les facteurs qui peuvent embrasser le problème de l'eau et ses impacts sur le milieu. Ce travail se veut donc plus exhaustif dans sa démarche. L'originalité de cette étude réside en plus de son caractère synthétique dans la prise en compte de l'aspect qualité de l'eau. Aucune étude préalable n'avait procédé à l'analyse de l'eau dans le cadre de la gestion des pratiques pastorales.

2.2 Situation géographique

L'étude a pour cadre la zone sylvo-pastorale nord du Sénégal qui appartient au Ferlo Nord (figure 6 et 7) et qui se situe entre 16° 08' 20" et 15° 49' 55" de latitude nord et entre 14° 56' 25" et 14° 48' 50" de longitude ouest. Cette zone d'étude est à cheval sur deux départements: celui de Linguère (région de Louga) pour les communautés rurales de Labgar et Namarel et de Podor (région de Saint-Louis) pour celles de Yaré Lao et Mbiddi (figure 7). Elle est centrée sur la réserve des six forages dont quatre nous intéressent : Mbiddi, Labgar, Yaré Lao et Namarel.

Le choix de ce secteur est dicté par le fait qu'il s'agit d'une région charnière entre la vallée du Sénégal - ancienne zone d'accueil du bétail au cours de la saison sèche, devenue aujourd'hui une région à grande vocation agricole, suite à l'implantation du barrage de Diama - et le sud du pays qui constitue, avec la Bassin Arachidier situé dans le centre ouest, les aires d'accueil actuelles des troupeaux. La zone étudiée est un lieu de naissance et un axe très actif de transhumance et d'acheminement du bétail. Les conditions physiques et climatiques du milieu en ont fait une région essentiellement sylvo-pastorale. Le département de Linguère renferme une importante part du cheptel national. Yaré Lao, Mbiddi et Labgar sont parmi les premiers villages où des forages furent implantés. Labgar en raison de sa position plus méridionale est plus arrosé et par conséquent plus fourni en pâturages. Ce qui en fait, en plus de ses infrastructures socio-économiques, un lieu de transhumance privilégié en cas de déficit fourrager des régions situées plus au nord.

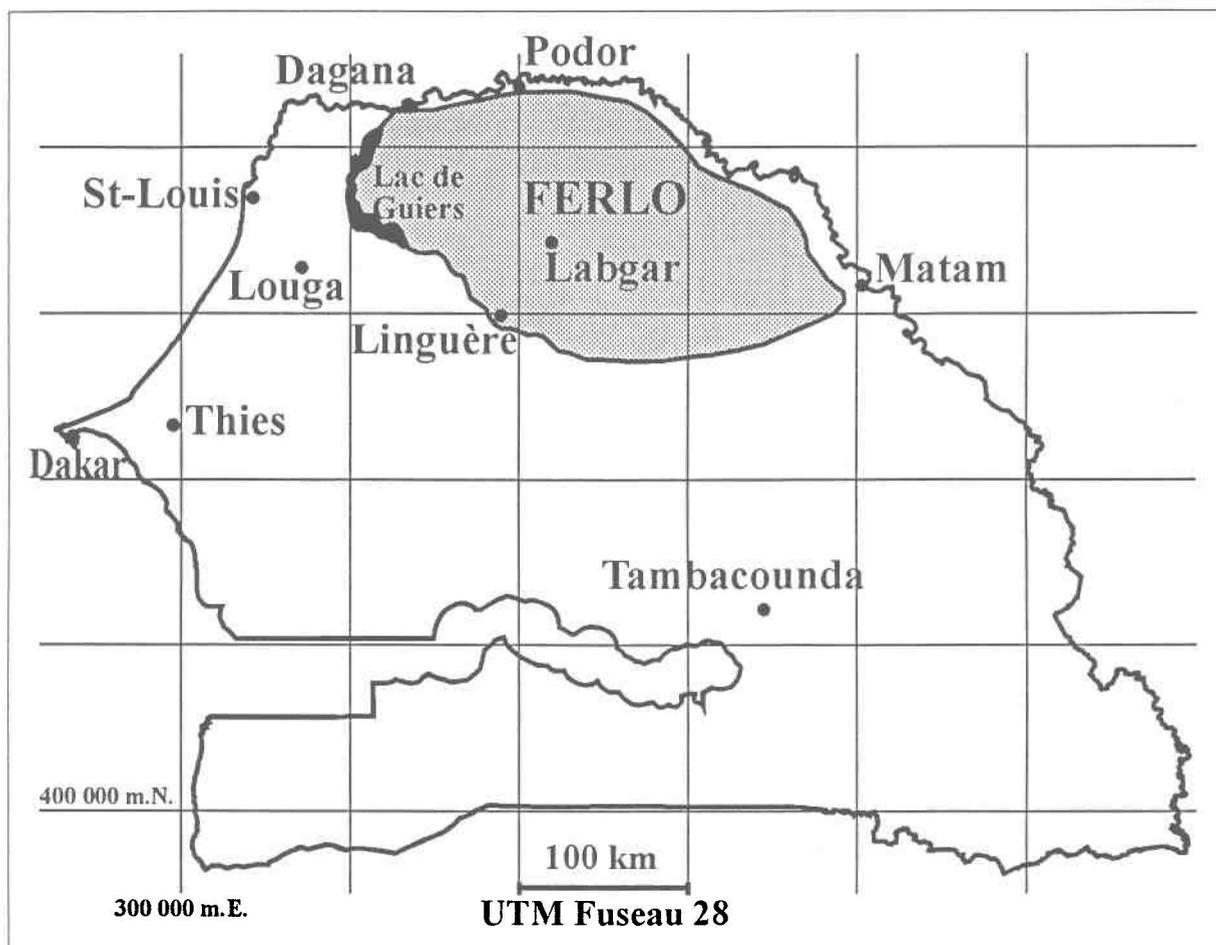
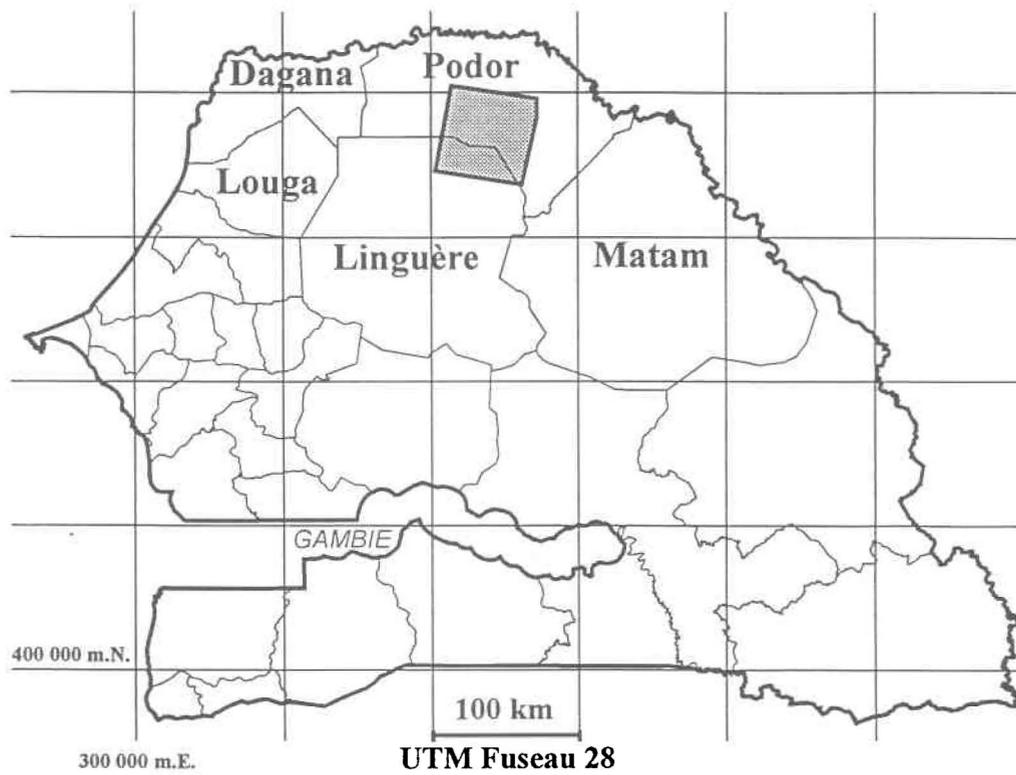


Figure 6: Le Ferlo nord du Sénégal



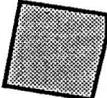
-  zone d'étude
- Podor** département
-  limite de département
-  frontière internationale



Figure 7 : Localisation de la zone d'étude

2.3 Influence des facteurs physiques sur l'écosystème pastoral sénégalais

2.3.1 Géomorphologie-géologie

La partie nord du Sénégal est une vaste plaine au modelé très monotone constitué d'ondulations sableuses de quelques mètres d'amplitude. Le point le plus élevé culmine à 73 m (Diawara, 1984). Géologiquement, la quasi-totalité du substrat de cette zone est constituée par les formations gréso-argileuses du Continental Terminal qui recouvrent, à l'est et au centre, celles de l'éocène supérieur et moyen et, à l'ouest, celles de l'éocène inférieur. Ce substrat est le plus souvent recouvert par les sables du quaternaire, mais dans la partie orientale, il est coiffé d'une cuirasse ferrugineuse plus ou moins démantelée et cimentée en une cuirasse gravillonnaire. Ceci permet de distinguer deux zones dans le Ferlo : le Ferlo sableux occidental et le Ferlo cuirassé, oriental. Le Ferlo sableux est caractérisé par l'existence de trois types de systèmes dunaires. Suivant l'ancienneté de ces systèmes, on distingue :

- les dunes à modelé faible de l'erg ancien (plus de 40 000 ans BP), plus largement représenté avec une orientation Nord-Est-Sud-Ouest. Cet erg se présente sous la forme d'une dune de plusieurs km de long, de faible dénivellation (2 à 3 m), et de 500 à 800 m de large. Les interdunes sont, soit des affleurements du substrat (gravillons le plus souvent), soit un matériau plus argileux

- les dunes rouges ogoliennes de l'erg moyen sur sable de type remanié (18 000 à 20 000 BP) : cet erg est formé des sables éoliens repris sur l'erg ancien. Il est de la même orientation que l'erg précédent avec des alignements de plusieurs kilomètres de long, 2 à 3 km de large et de plus forte dénivellation (3 à 6 m).

- les dunes de l'erg récent datent de 7 000 à 8000 ans BP et sont peu représentées dans la région.

Le modelé est beaucoup plus accentué (dénivellation supérieure à 10 m) et se présente sous forme de cordons d'orientation variable de 10 km de long et de 1 km de large environ.

2.3.2 Pédologie

L'existence de parties géologiquement distinctes (Ferlo cuirassé et Ferlo sableux) détermine pour l'essentiel le profil pédologique de cette zone (figure 8). On trouve en majorité (Maignen, 1965):

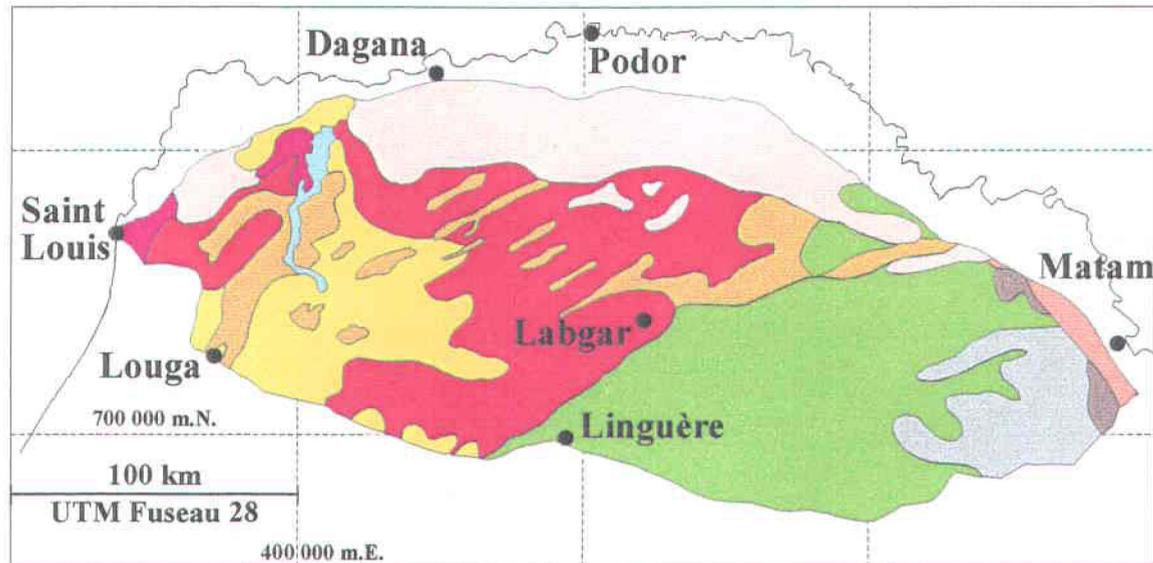
- *les sols cuirassés ferrugineux* sur grès argileux qui sont des sols pauvres en matière organique et peu profonds (moins de 1 m) avec très souvent un affleurement de l'horizon gravillonnaire ou argileux sous-jacent. Ils reposent sur les plateaux du Ferlo oriental, sont sensibles et subissent une érosion hydrique intense. La présence d'un horizon d'arrêt (cuirasse et argile) permet la rétention d'eau dans les zones dépressionnaires, constituant de nombreuses petites mares en saison des pluies.

Ces plateaux portent une végétation ayant l'aspect d'une savane arbustive où domine *Pterocarpus lucens*. Le tapis herbacé présente un aspect lépreux. Dans le réseau hydrographique fossile de Ferlo, ces sols subissent une certaine hydromorphie et supportent une végétation plus dense sous forme de savane arborée. Ils sont impropres à la culture et sont jugés pauvres pour le bétail,

- *les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés* sur matériau sableux sont des sols de pénéplaines hautes, au relief largement ondulé de l'erg récent. Ils sont répartis dans les parties Nord et Ouest du Ferlo. Ce sont des sols profonds, généralement massifs, avec une faible teneur en matière organique. Dans les interdunes, ils s'enrichissent en matériau argilo-limoneux.

La végétation recouvrant ces sols est une pseudo-steppe clairsemée d'arbustes de *Sclerocarya birrea* et *Balanites aegyptiaca*. Le tapis herbacé est dense et continu en saison des pluies; par contre, en saison sèche ces sols sont dénudés, du fait de la pâture et/ou des incendies, et exposés à une forte érosion éolienne,

- *les sols bruns à brun-rouges* subarides sont des sols rencontrés sur les pénéplaines basses



-  Cuirasse ferrugineuse sur grès argileux
-  Sol régolique sur grès argileux
-  Sol brun subaride intergrade hydromorphe sur sables colluviaux
-  Sol brun subaride modal sur marnes
-  Sol brun subaride intergrade, sol hydromorphe sur alluvions sableuses
-  Sol brun rouge intergrade, sol ferrugineux sur sables siliceux
-  Sol brun rouge faiblement évolué sur sables siliceux
-  Sol ferrugineux faiblement lessivé, lessivé en fer sur grès sablo-argileux souvent concrétionné et cuirassés en profondeur
-  Sol ferrugineux, faiblement lessivé, lessivé en fer sur sables siliceux
-  Sol halomorphe
-  Lac de Guiers

Figure 8: Esquisse pédologique du Nord Sénégal à l'exception des milieux hydromorphes de la vallée du fleuve Sénégal (J. Valenza et A.K Diallo, 1972).

à morphologie plane du système de l'erg ancien. On les trouve également dans les grandes dépressions interdunaires. Ces sols sont de couleur grise ou gris-brun en surface (reconnus comme étant les sols de *baljol* par les éleveurs), à texture argileuse ou argilo-sableuse, caractérisés par une compacité des horizons sous-jacents. Ils supportent une végétation de type pseudo-steppe arbustive, et sont réputés être de bons pâturages et d'excellentes terres d'agriculture.

Suivant la topographie, l'eau mise à la disposition des végétaux évolue différemment. Sur les systèmes dunaires à sols plus filtrants le drainage interne et latéral est très élevé alors qu'il est atténué sur les replats et les sols colmatés (Dièye, 1983).

2.3.3 Le climat

Le Sénégal est situé dans la zone intertropicale, entre les latitudes 12° 18 et 16° 40 Nord. Le Ferlo nord, par sa position latitudinale (entre 15° 20 et 16° 30 nord), est caractérisé par un climat tropical sec de type sahélo-sénégalais selon Valenza et Diallo (1972), faisant la transition entre le climat sahélien d'influence marine de la côte sénégalaise et le climat continental sahélo-soudanais. Il est marqué par deux saisons de durées inégales et variables du sud au nord : une saison sèche plus longue de 7 mois au sud et de 9 mois au nord, et une courte saison des pluies.

2.3.3.1 Les précipitations

Les précipitations se caractérisent par leur modestie. L'analyse des moyennes pluviométriques indique une grande variabilité interannuelle suivant les années et la station (figure 9), mais aussi intermensuelle. La saison pluvieuse se concentre entre juin et octobre, mais l'essentiel des précipitations (63%) tombent entre août et octobre. La faiblesse et l'irrégularité des pluies rendent toute activité agricole aléatoire et font de l'élevage la seule activité dont l'homme peut tirer profit (Dakono, 1983). Les pluies commandent l'apparition et la croissance du tapis herbacé. Elles conditionnent de par leur quantité et leur qualité la composition de la végétation, sa densité, sa production et sa répartition ainsi que les modalités de son

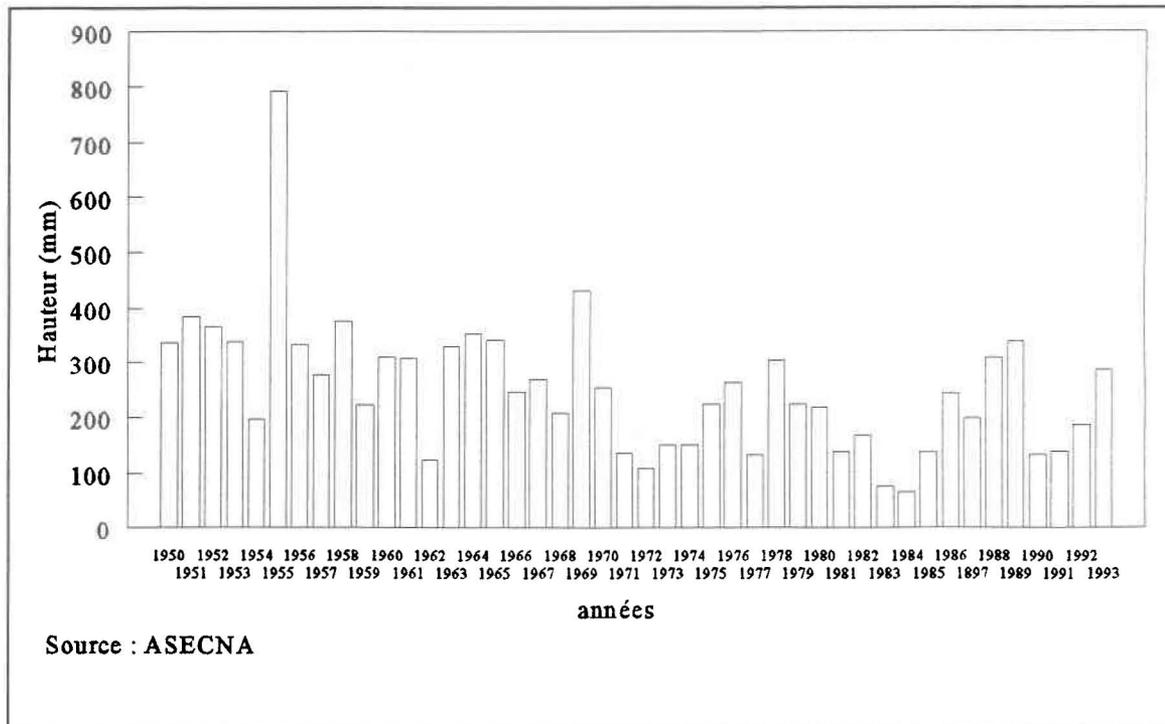


Figure 9: Évolution de la pluviométrie dans le département de Podor (1950-1993)

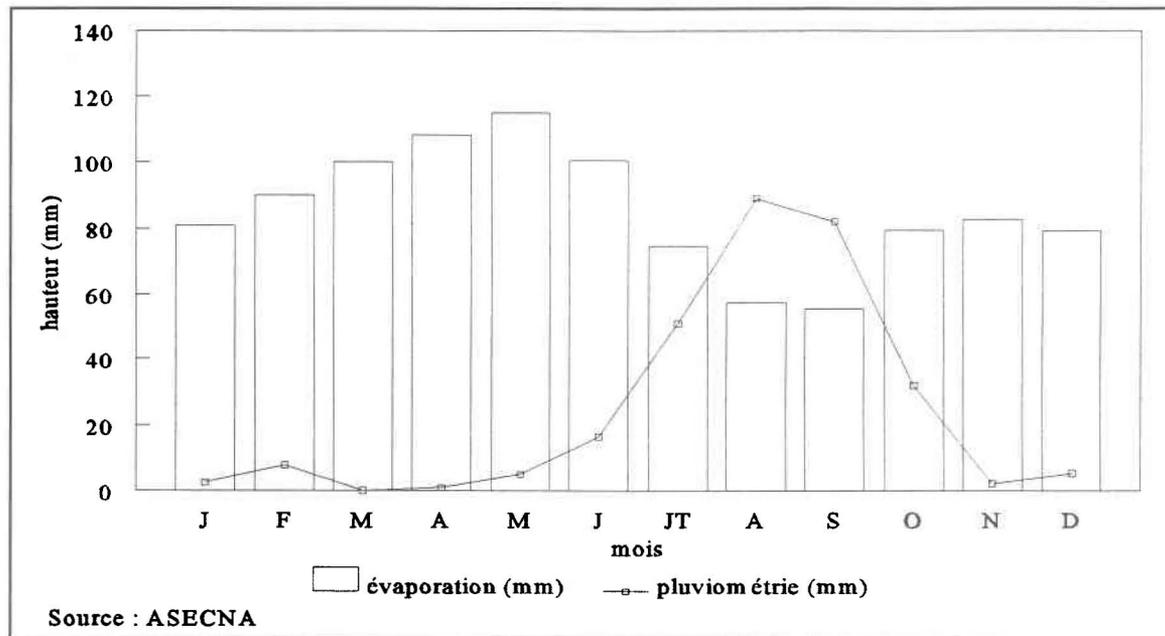
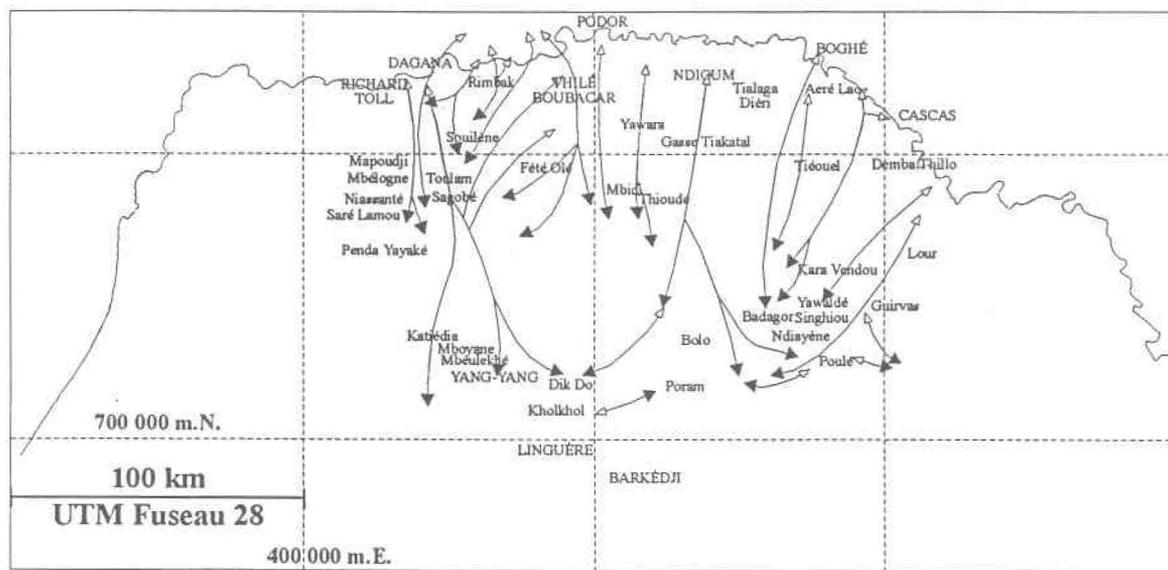


Figure 10: Répartition moyenne mensuelle de la pluviométrie et de l'évaporation dans le département de Podor (1971 - 1993)

exploitation. Elles engendrent également le remplissage des mares. L'apparition d'une phase sèche depuis les années 70 pose le problème de l'insuffisance des quantités d'eau apportées qui a entraîné des contraintes pour le système pastoral, l'eau étant la clef de voûte de ce dernier. Au niveau de la végétation, ces contraintes se traduisent par la disparition des espèces soudanaises dont les besoins en eau sont élevés et leur remplacement par d'autres qui sont plus adaptées aux conditions arides. L'instabilité des précipitations et leur déséquilibre spatio-temporel justifient en partie le caractère extensif de l'élevage. L'activité pastorale ne peut s'exercer que selon la disponibilité de l'eau, encore faudrait-il que cette eau soit parfaitement répartie par rapport au fourrage. Les pasteurs et leurs troupeaux sont à la recherche perpétuelle d'un fourrage dont la répartition est calquée sur celle de la pluviométrie. Ce qui occasionne des mouvements de transhumance.

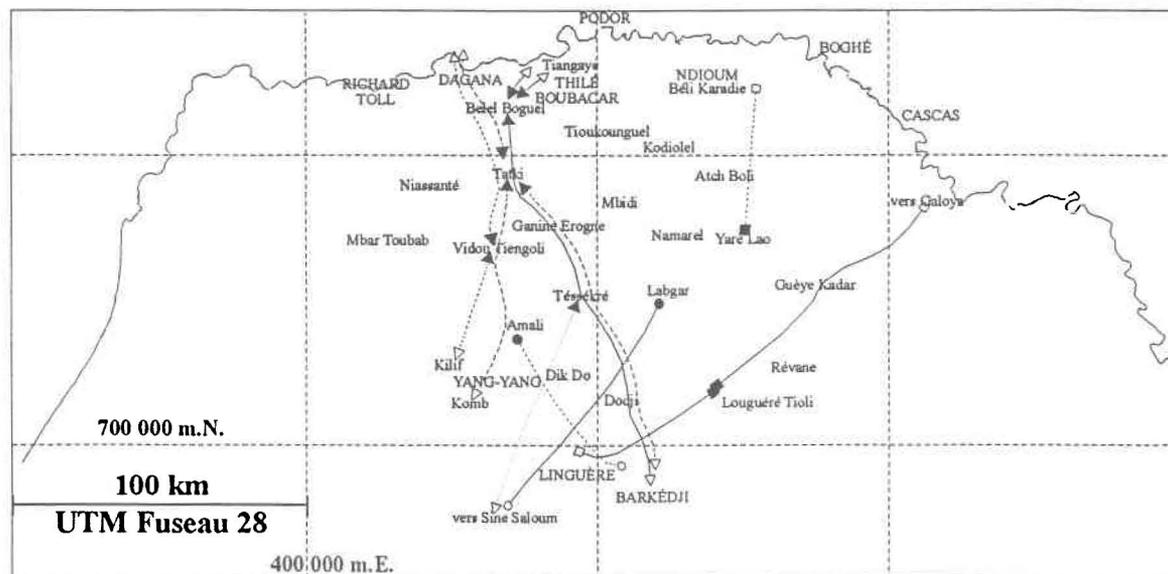
2.3.3.2 Les mouvements saisonniers

Ce sont des mouvements qui se reproduisaient anciennement, en supposant que la pluviométrie soit normale, permettant aux pasteurs de disposer de suffisamment d'herbe et d'eau. Au cours de la saison des pluies, le remplissage des mares permettait l'installation dans les campements d'hivernage situés le plus souvent autour de ces points d'eau. Le fourrage disponible et de bonne qualité assurait l'alimentation du bétail. Les pasteurs en profitaient pour se livrer à une agriculture sous-pluie d'autosubsistance. Quand la saison sèche s'installait et que les mares se desséchaient, ils migraient vers le fleuve Sénégal où ils profitaient de la culture de décrue et vers la vallée du Ferlo (Barral, 1982, 1983) (Figure 11 à 13). Après 1950, du fait de l'implantation des forages, ces derniers sont devenus des pôles d'attraction de saison sèche. Toutefois, leur degré d'attraction dépend des disponibilités fourragères et hydriques héritées de la saison des pluies précédente. Lorsque celles-ci sont déficitaires, le troupeau est conduit vers le bassin arachidier et la zone sylvo-pastorale sud (Figure 14). Or l'accroissement de la population dans le bassin agricole et de surcroît celui des terres cultivées, conjugué à l'amélioration des techniques de culture, ont abouti à l'exploitation intégrale des terres par les agriculteurs y compris celles qui portent les pâturages. Si bien que le troupeau se trouve refoulé au cours de la saison des pluies dans la zone sylvo-pastorale. Après les



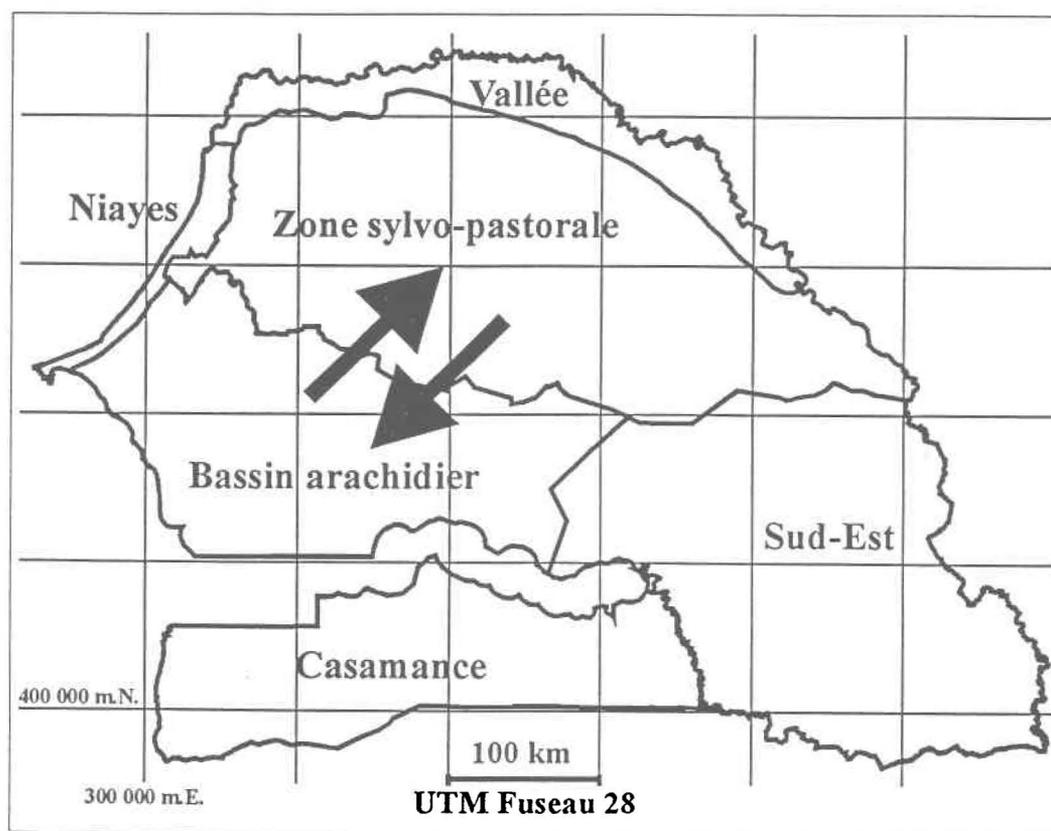
↙ Transhumances entre campements de saison humide (noir) et campements de saison sèche (blanc)

Figure 11: Transhumances antérieures aux forages dans le ferlo nord (d'après F. Bonnet-Dupeyron - 1952)



-  Transhumances des Peuls du forage de Belel Boquel
-  Transhumances des Peuls du forage de Tatké
-  Transhumances des Peuls du forage de Vidou Tiengoli
-  Transhumances des Peuls du forage de Tessekéré
-  Transhumances des Peuls du forage de Labgar
-  Transhumances des Peuls du forage d'Amali
-  Transhumances des Peuls du forage de Louguéré Tioli
-  Transhumances des Peuls du forage de Yaré Lao

Figure 13 : Transhumances en 1982 (d'après H. Barral, 1982)

**Vallée**

Aménagements hydro-agricoles
Prédominance des petits ruminants

Zone Sylvo-Pastorale

Domaine pastoral
Zone refuge du bétail en hivernage

Niayes

Zone de cultures maraîchères
Petit élevage intensif et semi-intensif

Bassin Arachidier

Domaine agricole
Zone de transhumance des troupeaux de la zone sylvo-pastorale en saison sèche

Casamance

Élevage sédentaire intégré aux exploitations agricoles

Sud-Est

Système agro-pastoral au nord
Agriculture au sud, en association avec un petit élevage de races trypanotolérantes au sud

Figure 14: Déplacements saisonniers des troupeaux en fonction des zones écologiques (Centre de Suivi Ecologique, 1991)

récoltes il revient exploiter les sous-produits agricoles et la végétation naturelle.

2.3.3.3 Les mouvements exceptionnels

Ils se produisent lors des grandes épisodes de sécheresse comme au cours des années 70-73 ou encore 83-84. Ils occasionnent un déplacement de pasteurs et de leurs troupeaux sur de longues distances.

D'autres facteurs moins directs que les précipitations, influent sur les potentialités fourragères et les ressources en eau: ce sont les températures, l'évaporation et l'humidité relative.

2.3.3.4 Les températures

Elles dépassent toujours 20° annuellement et les moyennes maximales se situent au dessus de 30° (figure 15). Les températures varient très peu ; elles sont relativement fraîches entre décembre et février. Leur maximum est enregistré en mai - juin au moment où souffle l'harmattan vent chaud et sec, alors qu'en juillet - août, elles baissent légèrement du fait de l'influence de la mousson. Les courbes de température moyenne et maximale sont unimodales avec un maximum principal en juin suivi d'un maximum secondaire en octobre. Celle de la température minimale est unimodale avec un maximum au mois de septembre. Les températures interviennent dans le bilan de l'eau et accélèrent l'évapotranspiration. Quand elles sont excessives, elle peuvent entraîner la mortalité des jeunes pousses. Elles commandent en partie la phénologie des espèces végétales qui composent le stock fourrager. Dès l'approche de la saison sèche les fortes températures provoquent l'assèchement des herbes qui se traduit chez le cheptel par une perte de poids considérable (Diène, 1987).

2.3.3.5 L'évaporation

L'évolution du diagramme s'oppose à celle de la pluviométrie (figure 10); l'évaporation potentielle est très forte dans ce secteur d'octobre à juin avec un maximum au mois de mai. Sa diminution qui s'étale sur trois mois (minimum en septembre) est deux fois plus rapide que son augmentation. Elle est accélérée par les températures très élevées; ce qui entraîne une

dessiccation de l'herbe et une perte en eau et en éléments minéraux. L'herbe, devenue une paille sèche, offre un pâturage de qualité médiocre. L'évaporation entraîne un important déficit hydrique qui explique le caractère très ouvert des formations végétales et l'assèchement rapide des mares.

2.3.3.6 L'humidité relative

Les trois courbes ont la même allure en cloche (figure 16) avec un maximum enregistré en août. L'augmentation de l'humidité à partir du mois de juin provoque le débourrement des végétaux. Les espèces qui avaient perdu leurs feuilles bourgeonnent et, parfois même, fleurissent.

Les facteurs climatiques offrent deux saisons bien contrastées : une saison sèche au cours de laquelle ils sont défavorables à toute activité végétative; une saison des pluies qui permet le déroulement du cycle végétatif des herbacées, l'apparition et la croissance des jeunes pousses ligneuses et le remplissage des mares. La répartition de la pluviométrie explique la prédominance des plantes annuelles. En outre, c'est le facteur qui permet de mieux saisir la répartition de la végétation, sa densité et sa dynamique saisonnière et annuelle.

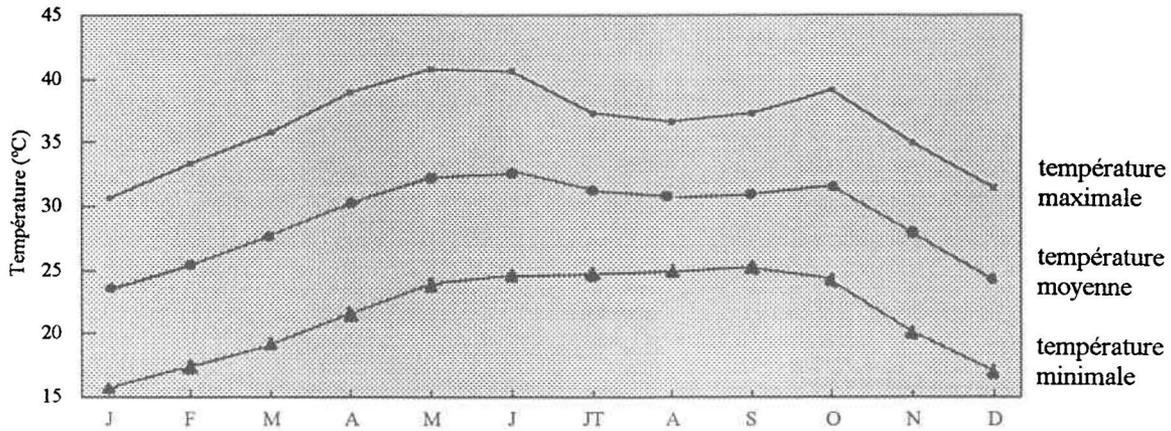
2.3.3.7 Les ressources en eau et leurs incidences sur la structuration de l'espace pastoral

Les ressources en eau se divisent en deux catégories : les eaux de surface et les eaux souterraines.

Les eaux de surface sont soit permanentes, soit temporaires.

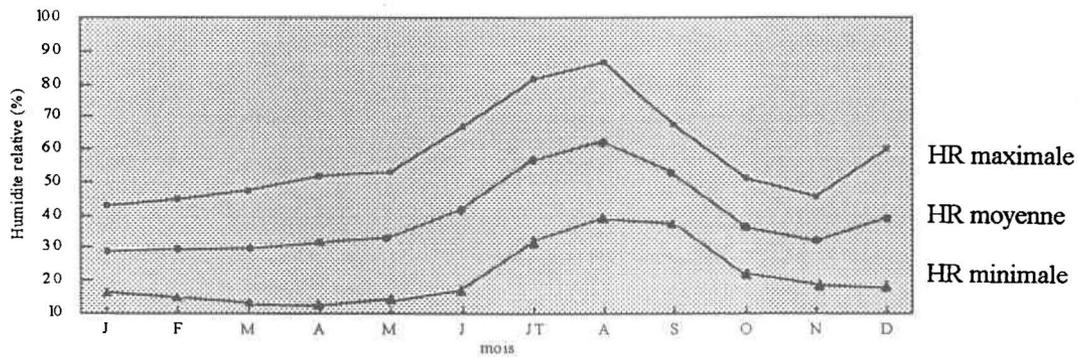
- *les eaux permanentes* sont représentées par le fleuve *Sénégal* et le lac de *Guiers*. Tous deux sont exploités à des fins hydroagricoles au détriment de l'accès du bétail. En ce qui concerne le lac de *Guiers*, son utilisation par le cheptel est compromise par les risques de parasitoses gastro-intestinales.

- *les eaux temporaires* : ce sont les mares caractérisées par leur existence saisonnière. Elles



Source : ASECNA

Figure 15 : Courbes de températures mensuelles en degré Celsius (1971-1993)



Source : A SECNA

Figure 16 : Évolution mensuelle de l'humidité relative entre 1971 et 1993.

sont issues des précipitations et localisées dans les zones dépressionnaires à forte teneur en argile. Elles sont d'une importance majeure dans ce Ferlo aréique. Elles tarissent vite, le plus souvent dès l'arrêt des précipitations à l'exception de celles qui sont les plus importantes. Malgré leur caractère souvent éphémère, leur exploitation est d'une grande utilité pour l'utilisation rationnelle des pâturages, pendant que le fourrage est disponible et de qualité, et du fait qu'elles soulagent la pression exercée au niveau des points d'eau permanents (puits et forages). Elles constituent aussi le point d'approvisionnement en eau pour la satisfaction des besoins domestiques.

Les eaux souterraines

Deux types de nappes sont exploitées (figure 17) :

- *la nappe libre* localisée dans les grès du continental terminal, les sables du quaternaire ou les calcaires marneux de l'éocène, dont le débit ponctuel est estimé à 3 à 10 m³/h. Peu profonde, elle est atteinte par les céanes et les puits profonds de 20 à 80 m (Archambault, J., 1960). Ceux-ci du fait de leur faible débit permettent l'abreuvement d'un petit nombre d'animaux et évitent ainsi la dégradation des parcours aux alentours.

- la nappe du Maëstrichien: nappe captive, c'est le système aquifère le plus important du Sénégal. Elle couvre environ 150 000 km². La pression hydrostatique peut en faire remonter le niveau à quelques mètres du sol avec un débit de 50 à 100 m³/h (Archambault, J., 1960). Cette nappe a permis le fonçage des forages (tableau 2) assurant l'utilisation des parcours en toutes saisons. Malheureusement ces forages entraînent une modification des conditions d'utilisation de ces parcours qui se traduit le plus souvent par leur dégradation. Ils ont engendré une modification des structures traditionnelles dans la zone sylvo-pastorale et ont permis d'asseoir des foyers de sédentarisation en organisant l'occupation de l'espace et les mouvements des hommes et des troupeaux. Ils répondent au souci de maîtriser l'espace en rapprochant l'eau du fourrage;malheureusement la maintenance de ces ouvrages hydrauliques

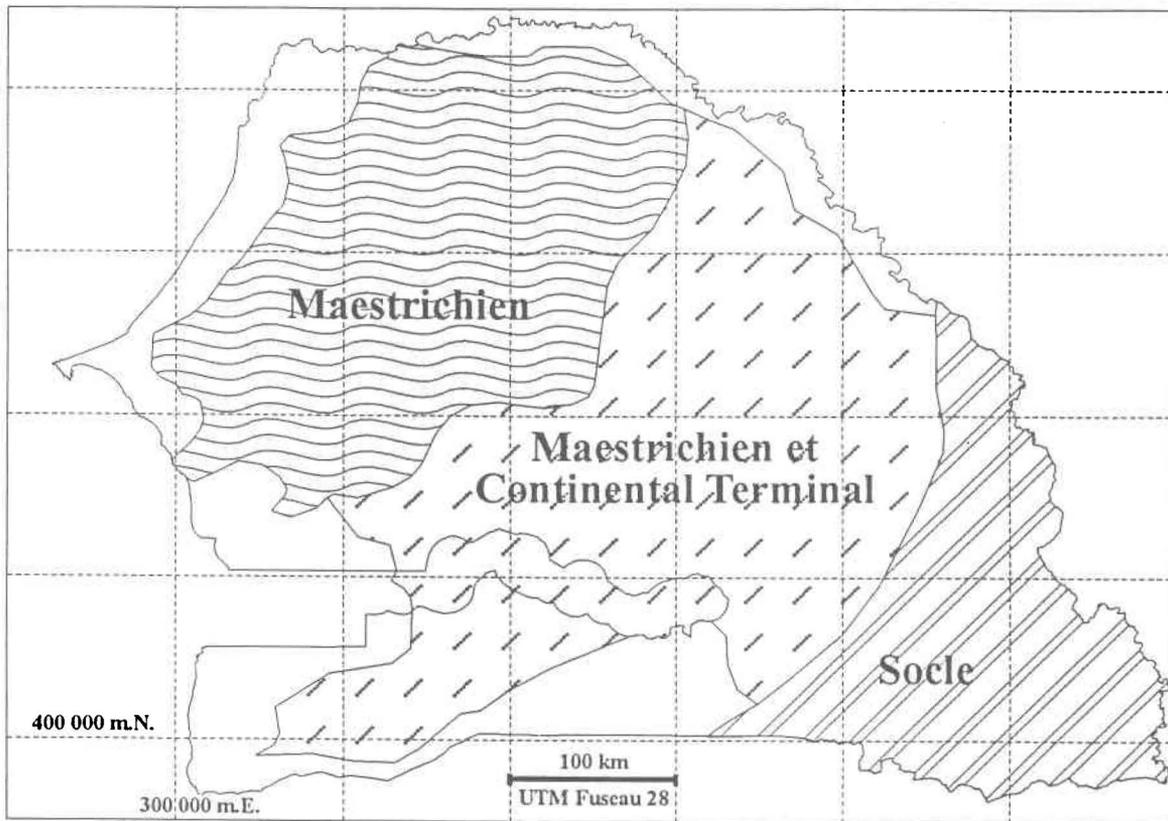


Figure 17 :Formations aquifères du Sénégal

forage	année	profondeur (m)	débit théorique (m³/h)	débit d'exploitation (m³/h)	ouvrage de stockage (réservoir)	ouvrage de distribution
Labgar	1952	289	50	30	1 rs 800 m ³	6 BF, 1 AB
Mbiddi	1953	230	66	50	1 rs 800 m ³	1 BF, 1 AB
Yaré-Lao	1953	252	100	30	1 rs 800 m ³	1 BF, 1 AB
Namarel	1969	198	ho rs d'usage	-	1 rs 200 m ³	2 BF, 2 AB

Tableau 2 : Forages recensés dans la zone d'étude.

fait souvent défaut ce qui oblige le troupeau à migrer vers d'autres zones où les pasteurs locaux sont envahis. L'installation des troupeaux autour des forages durant la longue saison sèche, entraîne une exploitation accélérée des pâturages environnants et l'émondage de la végétation ligneuse, au coeur de la saison, pour compléter l'alimentation (Ba, 1983; Sylla, 1984; Dégoto, 1984; Club du Sahel, 1986). Ainsi la végétation change de composition au détriment d'espèces moins appréciées. Dans le Ferlo cuirassé où le tapis végétal est plus difficile à régénérer, on observe quelquefois des auréoles de désertification.

Les mares offrent actuellement à l'éleveur les meilleurs moyens de gestion de l'espace. À cause de leur nombre important et de leur répartition dans l'espace, elles permettent l'abreuvement d'un nombre limité d'animaux - ce qui évite les problèmes de surpâturage - et permettent d'exploiter des pâturages qui ne le sont pas durant la saison sèche. Cela contribue à décharger les forages et leurs environs. Les transferts de sites de campement ne se produisent qu'en cas d'épuisement des pâturages. Toutefois, le caractère saisonnier des mares remet en cause leur portée pastorale et requiert leur recensement et leur aménagement ainsi que leur assainissement dans le but d'accroître leur durée et leur capacité fonctionnelle. Du point de vue sanitaire, l'exploitation de ce type de point d'eau entraîne des risques pathologiques pour l'homme et les animaux (Dia, 1981).

2.4 Évaluation et exploitation des ressources animales

Le Centre de Suivi Écologique procède à l'estimation des effectifs du cheptel, par la technique du Vol de Reconnaissance (VSR) à partir d'un avion volant à basse altitude. Les résultats du décompte de 1992 (tableaux 3 et 4) confirme la place prépondérante de l'élevage dans notre zone d'étude (CSE, 1991, 1992), (Marks, 1990).

Les bovins

Les résultats du décompte montrent que le département de Linguère se démarque pour le cheptel bovin avec 215.022 têtes représentant 18% du cheptel national. Les effectifs les plus faibles ont été enregistrés dans les départements de Louga (28.608 têtes), Podor (38.575

Départements	Densités (têtes/ km ²)	Effectifs (têtes)
Bambey	08	10960
Diourbel	12	15280
M'backé	21	35486
Dagana	07	44869
Matam	05	114997
Podor	03	38575
Bakel	09	208398
Tambacounda	09	179710
Kaffrine	11	123001
M'Bour	18	33224
Tivaouane	08	24416
Kébémér	14	55202
Linguère	11	215022
Louga	05	28608
Fatick	18	47163
Gossas	19	56482

Tableau 3 : Densités et effectifs des bovins recensés au Sénégal lors des VSR du CSE en 1992.

Départements	Densités (têtes/km ²)	Effectifs (têtes)
Bambey	39	52209
Diourbel	39	52049
M'Backé	34	58002
Dagana	13	82375
Matam	13	327986
Podor	21	269595
Bakel	09	192073
Tambacounda	18	368761
Kaffrine	20	225785
M'Bour	16	29190
Thiès	19	30339
Tivaouane	19	59907
Kébémér	32	125604
Linguère	31	602297
Louga	26	148862
Fatick	25	65176
Gossas	23	68832

Tableau 4 : Densités et effectifs des petits ruminants recensés au Sénégal lors des VSR du CSE en 1992.

têtes) et Dagana (44.869 têtes), probablement parce que ces régions ont été marquées par un déficit fourrager qui a contraint le troupeau à migrer vers des zones plus propices.

Les petits ruminants

Linguère abrite aussi 22% des petits ruminants soit 602.297 têtes. Ceux-ci se caractérisent partout par une nette prédominance par rapport aux autres espèces animales étant plus adaptées au contexte climatique actuel. La région de Louga occupe la première place dans ce type d'élevage, car avec Louga (148.862 têtes) et Kébémér (125.604 têtes) elle regroupe l'essentiel du cheptel national. Les plus fortes concentrations sont notées dans le Ferlo sableux.

Les chevaux

L'essentiel des effectifs est concentré dans les régions à vocation agricole où les chevaux sont utilisés dans le transport et la traction animale.

Les ânes

Localisés surtout en zone sylvo-pastorale essentiellement au niveau du Ferlo sableux et à proximité des points d'eau, ils sont utilisés généralement pour transporter l'eau, les personnes et des équipements divers. Leurs effectifs varient corrélativement à la disponibilité fourragère

L'évolution des effectifs

Les données sur les effectifs souffrent de nombreuses lacunes. À Podor l'évolution a connu une progression en dents de scie (Diène, 1987) avec une tendance générale à la baisse (figure 18), surtout au cours des années 83-85, années de sécheresse.

L'irrégularité de l'évolution du cheptel montre la vulnérabilité de l'élevage face aux conditions climatiques et aux facteurs pathologiques. Les premières déterminent l'alimentation du bétail et peuvent constituer un facteur limitant (Abdelmaddjit, 1981). D'ailleurs, les courbes d'évolution des effectifs du bétail et de la pluviométrie présentent

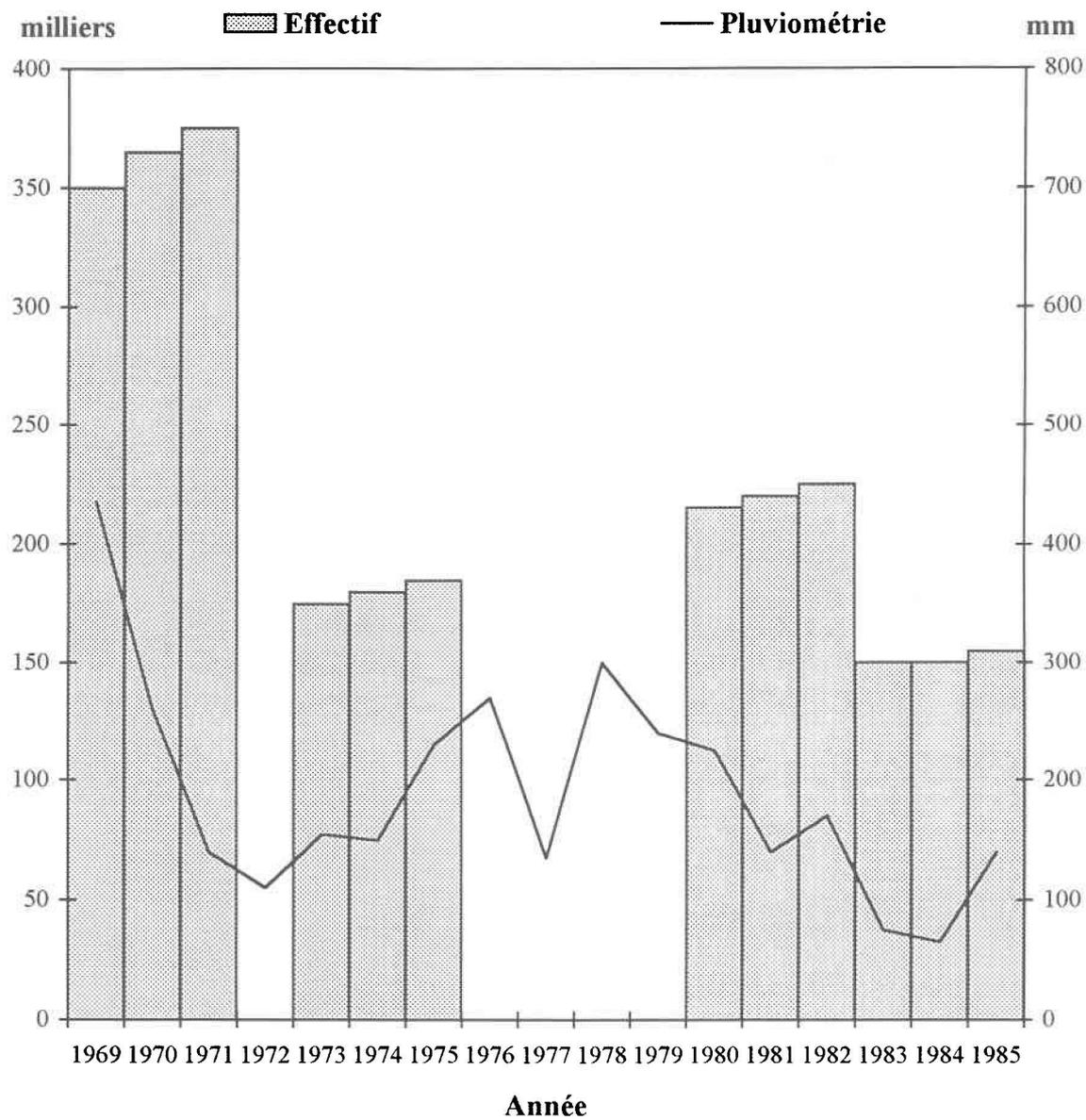


Figure 18: Évolution du cheptel et de la pluviométrie dans le département de Podor de 1969 à 1985.

toujours des similarités. Les facteurs climatiques se combinent à celles d'ordre sanitaire pour entraîner la décimation du bétail, surtout en années de sécheresse. Ils se traduisent par des pertes de poids, des retards de croissance chez les jeunes et par de fréquents avortements chez les femelles. En plus du déficit alimentaire souvent chronique, les longs déplacements peuvent causer cette situation.

La diversité des espèces élevées s'explique par le fait que devant la fragilité du troupeau, l'éleveur cherche à minimiser les effets dévastateurs des calamités naturelles en maximisant le plus possible son capital animal. Les petits ruminants sont beaucoup plus adaptés que les bovins aux conditions austères des pâturages du Ferlo sableux sénégalais (Gningue, 1990).

L'exploitation des ressources animales dans la zone sylvo-pastorale ne manque pas d'impact sur le milieu naturel. Le caractère individualiste de l'élevage est dicté par une stratégie de garantie des risques qui passe par l'accumulation du cheptel. Tout en permettant à l'éleveur de freiner les dommages en cas de disette et de mortalité du cheptel, cette attitude se révèle néfaste dès qu'il s'agit de l'intérêt de la communauté. En effet, une telle attitude ne peut aboutir qu'à la destruction de l'écosystème.

En résumé, la zone d'étude, de par sa situation géographique, appartient à une zone écologique marquée par la fragilité de son écosystème. Cela se ressent à travers les conditions climatiques. Les totaux pluviométriques faibles et mal répartis offrent un potentiel fourrager souvent difficile à gérer. Des ressources hydriques éphémères limitent l'efficacité quant à leur utilisation. La géomorphologie a mis en place deux zones pédologiques contrastées quant à la nature de leur substrat et dont les potentialités végétales et hydriques s'opposent : le Ferlo sableux est doté de sols profonds, avec une capacité d'infiltration élevée, favorable à l'installation et à la croissance d'un tapis herbacé haut et dense. Malheureusement, celle-ci constitue en même temps un frein à la formation des plans d'eau superficiels. Ces derniers se concentrent dans les dépressions argileuses. À l'opposé, la présence de l'horizon gravillonnaire dans le Ferlo cuirassé est favorable à l'accumulation de l'eau dans les

dépansions, alors que le potentiel fourrager y est plus faible. Cette dichotomie exige des modalités de gestion des pâturages et des points d'eau largement tributaires de la présence du fourrage et de l'eau.

La disponibilité et l'exploitation des ressources hydriques et fourragères justifient la réussite de l'élevage fortement tributaire des conditions climatiques et sanitaires. Le développement de cette activité économique, qui entraîne une amélioration du niveau de vie des populations locales, doit se faire dans un souci de sauvegarde des écosystèmes pastoraux

Après les facteurs physiques, les disponibilités végétales et hydriques doivent être évaluées en terme de quantité et de qualité, de leur répartition spatiale en fonction des saisons, des modalités de leur exploitation, de même que de l'incidence de leur gestion sur les hommes et sur le milieu naturel.

2.5 Évaluation des pâturages

2.5.1 Composition floristique

La détermination du fourrage disponible doit tenir compte de la composition floristique des pâturages qui détermine la qualité et la quantité du fourrage disponible (Penning de Vries et Djitéye, 1982; Ridder *et al.*, 1980). Il importe de connaître le type de photosynthèse des espèces, leur période de croissance, la biomasse produite et leur appétibilité. Tout cela, en fonction des saisons.

À partir des photographies aériennes et de la carte pédologique, quatre types de sols ont été retenus dans la zone d'étude :

- les sols ferrugineux tropicaux sableux à sablo-argileux,
- les sols bruns subarides argilo-limoneux,
- les sols cuirassés,
- les sols hydromorphes.

Les pâturages sur sol sableux à sablo-argileux

Les sols sableux des systèmes dunaires de l'erg récent se caractérisent par une couverture ligneuse faible sur les sommets de dunes, alors que le tapis herbacé est continu. Ils sont appelés *seno* par les peuls. La formation végétale présente est une pseudo-steppe arbustive dominée par *Boscia senegalensis*, *Calotropis procera*, *Balanites aegyptiaca*, *Guiera senegalensis*, *Grewia bicolor*, *Combretum glutinosum*, *Sclerocarya birrea*, *Acacia Senegal* et *Commiphora africana*.

La strate herbacée généralement haute et dense est très variée avec : *Zornia glochidiata*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Aristida mutabilis*, *Cenchrus biflorus*, *Chloris prierii*, *Schoenofeldia gracilis*, *Spermacos Stachydea*, *Tragus racemosus*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Tribulis terrestris*, *Eragrotis tremula*, *Indigofera dendroides*, *Loudetia togoensis* et *Boerhaavia diffusa*.

Les pâturages sur sol argileux à argilo-sableux

Ils couvrent les pénélaines basses de l'erg ancien et les interdunes larges et évasées de l'erg récent. Le matériau très compacté entraîne en saison des pluies un engorgement temporaire et la constitution de multiples petites mares. Ces sols sont appelés *baljol*. La formation végétale est la même que pour le type de sol précédent. La strate ligneuse plus haute et plus dense est composée des espèces suivantes : *Boscia senegalensis*, *Calotropis procera*, *Guiera senegalensis*, *Commiphora africana*, *Balanites aegyptiaca* et *Grewia bicolor*.

Eragrotis tremula, *Zornia glochidiata*, *Indigofera dendroides*, *Chloris prierii*, *Tribulis terrestris*, *Ceratotheca sesamoides*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Mollugo naudicaulis*, *Cenchrus biflorus*, *Cyperus iria*, *Panicum laetum*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Tragus racemosus* et *Spermacos stachydea* constituent la strate herbacée.

Les pâturages sur sols cuirassés

Ces sols portent le nom local de *sanghré*. Ce sont les sols gravillonnaires des plateaux du Ferlo ferrugineux. On y trouve une savane arbustive peu dense avec comme espèces arborées,

Boscia senegalensis, *Combretum aculeatum*, *Acacia senegal*, *Grewia bicolor* et *Combretum glutinosum*. Les arbustes sont représentés par *Ziziphus mauritiana*, *Adenium obaesum* et *Guiera senegalensis*.

Le tapis herbacé est discontinu; il forme des touffes là où la cuirasse n'affleure pas. Il est constitué de *Aristida mutabilis*, *Loudetia togoensis*, *Eragrotis tremula*, *Chloris prierii*, *Schoenefeldia gracilis*, *Zornia glochidiata*, *Tribulis terrestris*, *Cenchrus biflorus*, *Boerhaavia diffusa* et *Mollugo naudicaulis*.

Les pâturages sur sols hydromorphes

Les sols hydromorphes, sur matériau gravillonnaire des vallées mortes, sont plus profonds avec une texture limoneuse, argilo-sableuse. Ils sont appelés *caangol*. C'est le lieu de collecte des eaux de ruissellement formant des mares temporaires. Sur ces sols la végétation est souvent dense et boisée, avec prédominance de *Myragina Inermis*, *Anogeissus leiocarpus*, *Acacia seyal* et *bauhinia rufescens*.

2.5.2 Les potentialités fourragères

Le tapis herbacé

Pour étudier la valeur alimentaire d'un parcours, il faut tenir compte de sa description botanique et de sa production primaire (Guérin, 1983). En plus de ces deux paramètres, il faut considérer son accessibilité et sa proximité des points d'abreuvement (Halidou, 1983).

Les potentialités fourragères dépendent de la germination et de l'installation de l'espèce, de sa croissance végétative, de la production de semences et de la période de repos. Le caractère du tapis herbacé résulte de l'importance, de la fréquence de la distribution des pluies au début de l'hivernage en rapport avec le stock de grain disponible et l'humidité du milieu.

La germination joue un rôle très important, elle est différente suivant les espèces considérées.

- Chez les légumineuses : une partie des graines germent vite (tableau 5) tandis que l'autre le

Espèce	Poids de 1.000 graines (g)	Dureté des graines	Vitesse de germination	Hétérogénéité des semences
Graminées				
<i>Aristida mutabilis</i>	0,5	-	+++	+
<i>Cenchrus biflorus</i>	2,1	-	+++	+
<i>Chloris prierii</i>	0,2	-	+++	+
<i>Dactylocten. egypt.</i>	0,3	+	++	++
<i>Eragrotis tremula</i>	0,05	++	+	+++
<i>Loudetia togoensis</i>	4,1	-	++	+
<i>Panicum laetum</i>	1,4	+	++	++
<i>Schoenefeldia gracilis</i>	0,2	-	++	+
Autres herbacées				
<i>Alysicarpus ovalif.</i>	3,5	++	(+++)**	++
<i>Cassia mimosoides</i>	3,6	++	++	++
<i>Tribulis terrestris</i>	1,1	?	+++	+
<i>Zornia glochidiata</i>	1,9	++	(+++)**	+++

Tableau 5 : Caractérisation des graines de certaines espèces sahéliennes par leur poids, la dureté, l'hétérogénéité des semences et par la vitesse de la germination (Penning de Vries et Djitéye, 1982).

Légende (tableau 5)

dureté :

- bonne germination sans scarification
- + certaine augmentation du pouvoir germinatif par scarification etc.
- ++ augmentation notable du pouvoir germinatif par scarification etc.

vitesse de germination :

- +++ premières plantules déjà le jour après une pluie suffisamment importante
- ++ premières plantules quelques jours après une pluie
- + premières germinations plusieurs jours après une pluie ou après quelques pluies

hétérogénéité :

- + dans des conditions maximales, germination complète après quelques jours
- ++ germination complète après plusieurs jours
- +++ germination complète après quelques semaines

** fraction des graines seulement qui germent très vite.

fait de façon étalée (Cissé, 1986). Cela explique la germination en vagues. Le premier flux correspond aux graines qui ont perdu leur dureté durant la saison sèche par altération de leur enveloppe protectrice. Les légumineuses se caractérisent donc par l'hétérogénéité de leurs semences. C'est le cas de *Zornia glochidiata*, *Alysicarpus ovalifolius* et *Cassia mimosoides*. *Tribulis terrestris* est une espèce à germination rapide par vagues successives. Elle ne présente aucune dormance et souvent fait deux cycles complets durant la saison des pluies. Ses fruits se subdivisent en plusieurs méricarpes contenant chacun en moyenne quatre graines, mais seule une graine germe à la fois (Penning de Vries et Djitéye, 1982). Les légumineuses contribuent à l'enrichissement du sol. Elles peuvent fixer l'azote et améliorent la qualité des pâturages. Elles représentent une bonne partie de la biomasse des terrains à fort ruissellement. C'est le cas de *Zornia* qui peut occuper une bonne partie de la biomasse des terrains à sols sablo-limoneux et limoneux à proximité des points d'abreuvement et des pistes du bétail.

- Chez les graminées, *Cenchrus biflorus* germe vite et en vague (tableau 6). *Eragrotis tremula* et plusieurs espèces du genre *Borreria* présentent une dureté liée à l'albumen corné. La présence des enveloppes autour des graines de graminées peut aussi gêner la germination. C'est le cas de *Schoenefeldia gracilis*.

La majorité des espèces présentes dans la zone d'étude ont une photosynthèse de type C4 (tableau 6) c'est à dire qu'elles ont un fort pouvoir de dilution des éléments nutritifs (azote et phosphore) pour produire plus de biomasse lorsque les autres conditions le permettent (Cissé, 1986), alors que les espèces dont la photosynthèse est de type C3 investissent beaucoup plus dans la production de semences comme *Zornia*. Ce qui explique leur maintien dans des groupes herbacés malgré leur faible force de concurrence durant la croissance.

Les espèces végétales du Ferlo se distinguent aussi par leur résistance face à la sécheresse (tableau 6). Leur cycle végétatif court fait qu'elles sont bien adaptées à la brièveté de la période humide reliée à la faible disponibilité de l'eau au Sahel. Ainsi, *Cenchrus* colonise rapidement le sable meuble, *Zornia* se développe sur les sols squelettiques, tandis que les

Espèce	vitesse de germination	vague	résistance	photosyn- thèse	cycle	dureté
<i>Cenchrus biflorus</i>	r	++	+++	C4	C	+
<i>Schoenefeldia gracilis</i>	r	+	+++	C4	C	+
<i>Loudetia togoensis</i>	r	+	+++	C4	C	+
<i>Blepharis linariifolia</i>	r	+	+++	C4	L	+
<i>Zornia glochidiata</i>	h	+++	++	C3	C	++
<i>Cassia mimosoides</i>	h	++	++	C3?	L	++
<i>Eragrotis tremula</i>	l	+++	++	C4	C	++
<i>Tribulis terrestris</i>	r	+	+++	C4	C	+
<i>Borreria stachydea</i>	l	-	-	-	C	+

Tableau 6 : Classification des espèces suivant leur force de concurrence avec indication des caractères dominants qui déterminent cette force de concurrence (Penning et Djitéye, 1982).

Légende (tableau 6)**germination :**

r = rapide

l = lente

h = hétérogène

vague de germination :

+ = peu de vagues

++ = quelques vagues

+++ = plusieurs vagues (en général)

résistance :

+ = pas résistante

++ = faiblement résistante

+++ = résistante

photosynthèse :

type C3, C4;

longueur du cycle :

l = cycle long

c = cycle court

dureté :

+ = sans dureté

++ = dure

terrains limoneux dégradés sont apprivoisés par *Dactyloctenium et Zornia*. Ces espèces sont soit des thérophytes, soit des géophytes à bulbes ou à rhizomes. Leurs parties aériennes fleurissent, fructifient et se dessèchent (cas de *Zornia, Tribulis*). Elles passent la saison sèche sous forme de graines.

Toutes les espèces recensées sont appréciées suivant le stade phénologique. Le bétail montre une préférence pour les légumineuses qui semblent leur donner plus d'embonpoint. *Alysicarpus* est très recherchée durant la saison pluvieuse. *Zornia* est peu broutée avant la fin du cycle de même que *Loutedia* et *Elionoris*. *Cenchrus, Tribulis* et les *Aristidae* ne sont pas broutées durant la fructification à cause de leurs épines.

Le fourrage aérien

Les espèces ligneuses recensées constituent de bons fourrages appréciés par la plupart des animaux (Le Houérou, 1980).

Commiphora africana

Cette plante a un rôle fourrager important du fait de la précession de sa feuillaison dès la fin du mois de mai. Ce rôle est déterminant dans la survie du bétail car cette feuillaison arrive au moment le plus critique. Sa valeur bromatologique est moyenne à bonne (8-14% de protéines brutes, 0,15 à 0,18% de phosphore avec un rapport Ca/P un peu trop élevé de 5 à 6 (Le Houérou, 1980). *Commiphora* apporte une nourriture concentrée sous un faible volume (14,8% de matières azotées totales avec 8,3% d'humidité et 9,4% de matières minérales) (Gillet in Dia, 1985).

Boscia senegalensis

Jadis peu appréciée, c'est l'une des meilleures plantes fourragères. Sa teneur en protéines est très élevée (30% en plus de 22,9 % de cellulose et 6,9 % de matières minérales). C'est un ligneux particulièrement résistant à la sécheresse. Sa colonisation du Sahel a obligé le bétail à s'adapter à la consommation des jeunes feuilles.

Combretum aculeatum

Sa bonne valeur bromatologique en fait un arbre fourrager (16% de protéines brutes, 10% de minéraux, 0,23 de phosphore). C'est une espèce qui régénère vigoureusement lorsqu'elle est protégée du surpâturage. Son taux de germination est élevé (60-80%) et elle se multiplie par rejets de souche. La feuillaison est précoce et commence dès le début de la saison des pluies. Son feuillage est fort apprécié.

Pterocarpus lucens

Bien que perdant ses feuilles dès la première moitié de la saison sèche, il se caractérise par un fourrage excellent, il est vendu sur les marchés pour l'alimentation des moutons de case, des vaches laitières et des chevaux. L'émondage peut prolonger considérablement la phénophase feuillée (Cissé in Hiernaux *et al.*, 1979). Cette espèce fait l'objet d'une régression au Sahel, car sa régénération est très mauvaise et son taux de germination voisin de zéro.

Acacia senegal

C'est un arbuste typiquement sahélien dont la valeur bromatologique est bonne. Ses feuilles et ses gousses sont excellentes (22% de protéines brutes).

Ziziphus mauritiana

C'est un arbre qui supporte les grandes chaleurs et la sécheresse (Von maydell, 1990). Il résiste à la surexploitation en rejetant vigoureusement de souche. Son taux de protéines brutes est de 15,5%, avec 0,16% de phosphore.

Grewia bicolor

Sa valeur bromatologique est moyenne à bonne avec 11% de protéines brutes, 0,14% de phosphore. Les feuilles sèches demeurent sur l'arbre quelque temps avant de tomber, restant ainsi disponibles pendant la saison sèche pour le bétail; en octobre, les feuilles sèches enroulées en cigare conservent de l'humidité (55%) (Gillet in Dia, 1985). On trouve cet arbre fréquemment dans les dépressions ou associé aux termitières.

Balanites aegyptiaca

De tous les arbres du Sahel, c'est le plus résistant à la sécheresse. Son taux de protéines est de 15% celui de phosphore, 0,11%. Les feuilles commencent à tomber dès janvier et les rameaux chlorophylliens sont recherchés par les herbivores domestiques et sauvages. Les fruits sont aussi consommés. Il peut pousser sur tous les sols quelque soit la topographie.

Guiera senegalensis

C'est un indice de surpâturage (Von Maydel, 1990). Il pousse sur les sols sableux généralement dans des endroits très secs et sur les jachères. C'est une espèce peu consommée.

Combretum glutinosum

Arbre et arbuste à floraison hivernale, ses feuilles, habituellement peu appréciées, sont quand même consommées par le bétail affamé, ce qui fut le cas des dernières années (Gillet in Dia, 1985).

En plus des deux dernières espèces citées, *Adenium obesum* et *Calotropis procera* constituent des espèces secondaires habituellement peu consommées. Les feuilles de *Calotropis* sont broutées par les chèvres et, exceptionnellement, par les moutons affamés. Le latex a un goût caustique brûlant et il est toxique (Von Maydell, 1990).

La composition floristique de la zone d'étude montre qu'elle dispose d'espèces variées et de qualité, capables de résister à la sécheresse. Sur les sols cuirassés dits *sanghre*, la végétation est très pauvre mais bien exploitée au cours de la saison sèche par les petits ruminants. D'après les pasteurs, cette végétation est recherchée à cause de la présence des "éléments minéraux liés à la cuirasse" (communication personnelle). Sur le *seno*, le fourrage abondant durant la saison des pluies et de bonne qualité est rapidement détruit en saison sèche, suite à sa surexploitation par l'homme et l'animal, qui laisse un sol nu sablonneux très sensible à l'érosion éolienne. Enfin dans le *baljol*, la strate herbacée moins dense et moins haute que sur *seno*, offre une composition floristique plus variée avec une présence importante de légumineuses.

En plus de la composition végétale, l'évaluation des parcours du Ferlo doit tenir compte de la production végétale.

2.5.3 La production végétale

Après exploitation préliminaire des fiches de terrain, on calcule le taux de matière sèche après étuvage des échantillons. Ce taux est donné par le rapport poids sec sur poids vert. La production totale de chaque site est obtenue en additionnant la production herbacée et la production foliaire des ligneux. L'évaluation de la production primaire requiert la combinaison de données satellitaires corrélées aux mesures faites sur le terrain de la biomasse herbacée, ligneuse et totale.

2.5.4 Calcul des capacités de charge

La capacité de charge d'un pâturage est définie par "la quantité de bétail que peut supporter le pâturage sans se détériorer; le bétail devant rester en bon état d'entretien, voire prendre du poids ou produire du lait pendant son séjour sur le pâturage" (Boudet, 1985). Le calcul se fait par la conversion du nombre de têtes recensées dans la zone d'étude en UBT (unité de bétail tropical) suivant les normes de l'Ecole Inter - Etat de Médecine Vétérinaire (IEMVT) définies en 1987.

Espèce	normes anciennes	normes récentes
bovin	0,73 UBT	0,8 UBT
ovin	0,12	0,18
caprin	0,12	0,16
équin	1	1
asin	0,50	0,53
camelin	1	1,18

Tableau 7 : Normes de calcul des capacités de charge

La production moyenne de la zone d'étude qui couvre 248000 ha, est de 1100 kg de matière sèche à l'hectare et le nombre d'UBT, de 11000. La biomasse utilisable après la prise en considération des pertes dues aux feux de brousse, au vent, au piétinement, est estimée au tiers

de cette valeur. Considérant qu'une UBT a besoin de 6,25 kg de matière sèche par jour:

le nombre de jours de pâture est égal à : $387 / 6,25 = 62$

la capacité de charge théorique est de : $270 / 62 = 4$ ha / UBT en saison sèche.

Or la charge réelle est de $11000 / 248000 = 0,044$ UBT / ha.

La possibilité d'accueil de la zone est de $248000 / 4 = 56886$ UBT or seulement 11000 UBT ont été recensées ce qui permet de conclure que cette zone est sous-pâturée et que l'utilisation des ressources n'est pas optimale.

Le calcul de la production moyenne de matière sèche cache cependant bien des disparités. Toute moyenne représente une valeur figée dans le temps. Or, dans un Sahel où la pluviométrie est fluctuante d'une année à l'autre et même au cours d'une même année, les variations sont énormes dans l'offre de nourriture, dans sa qualité d'une année à l'autre et d'un endroit à l'autre. Ces grandes fluctuations combinées à un manque périodique d'eau d'abreuvement au fur et à mesure de la longue saison sèche incitent les éleveurs à se déplacer avec leurs troupeaux. Même si la zone est *à priori* sous-pâturée, il importe de souligner que l'exploitation des pâturages n'est possible que par la disponibilité de points d'eau aux alentours. Aussi faudrait-il évaluer les ressources en eau en termes de quantité, de qualité et suivant leur répartition spatiale et temporelle par rapport au fourrage.

2.6 Évaluation des ressources hydriques

2.6.1 Les forages

Ce sont les points d'eau de la longue saison sèche; les quatre forages de la zone d'étude sont distants de 40 km. Chacun polarise les campements situés dans un rayon de 15 à 20 km, ce qui représente la distance maximale parcourue par le bétail. L'exhaure de l'eau est mécanique. Le forage fonctionne avec un moteur diesel. L'eau est stockée dans un bassin à ciel ouvert

dans lequel sont plongés des raccords. Le bétail s'abreuve dans des abreuvoirs. Sous l'intensité du piétinement et avec les quantités d'eau déversées, le sol environnant se transforme en borbier. Contrairement à celle de la mare, l'eau du forage n'est pas gratuite; elle fait l'objet d'une taxe mensuelle fixée selon la taille des troupeaux.

2.6.2 Les mares

La zone d'étude regorge de mares résultant de la concentration des eaux de ruissellement dans les dépressions au cours de la saison pluvieuse. Les mares sont localisées dans les bas-fonds argileux du *baljol* ou dans les bancs de roches latéritiques du Ferlo cuirassé. Elles sont très nombreuses, (nous en avons recensé une cinquantaine) uniformément réparties dans l'espace tout autour de chaque village (Carte des mares en annexe). L'aire d'influence moyenne d'une mare se situe aux environs de 5-6 km. Les mares sont peu profondes (quelques mètres) et leur appellation varie suivant leur taille. Cheikh Ba en distingue plusieurs : la plus grande mare se nomme *wendu* (pluriel *belli*), les petites mares éphémères sur dalle ou cuirasses ferrugineuses portent le nom de *pete* (*fetere*). La toute petite mare est désignée par le terme *beel* (*mbeelon*). Le *lumbol* (pluriel *lumbi*) indique la mare de l'année passée, vaste, peu profonde et entourée d'arbres. C'est aussi la vallée sèche jalonnée de mares temporaires très étendues (plus de 10 000 m² parfois) et sous lesquelles gît une nappe phréatique peu profonde, exploitable en cas d'assèchement. Le *luggere* est une étendue moyenne et profonde entourée de bosquets (Dia, 1986).

Ces mares sont de durée variable, allant de quelques semaines à trois mois après l'arrêt de la pluie. Les plus importantes sont celles de Céterma, Lédème, Lumbol thill, Bourma, Mbelkoum, Mbélogne, Lumbi nelli, Mbagoudobe et Rindo.

Durant la saison pluvieuse, la mare est la seule source d'abreuvement du bétail et des populations locales. Théoriquement, l'utilisation en est réglementée. Les usagers doivent éviter d'y plonger les habits et les ustensiles. Ils utilisent des bassines pour puiser l'eau et pour faire la lessive et la vaisselle à côté de la mare. La baignade est également interdite dans

certaines mares destinées uniquement à l'alimentation (cas des petites mares de Kadione: Lumbol namadi et wendu Lumbogne). En réalité, cette interdiction n'est pas respectée, surtout par les enfants. Il est rare qu'une mare fasse l'objet de surveillance.

L'eau de la mare est très boueuse et trouble à cause de la présence de particules argileuses en suspension, de débris végétaux et de fèces. Chaque mare est entourée d'une végétation très dense qui lui confère un micro-climat plus frais. Les arbres peuvent atteindre une dizaine de mètres de hauteur et sont colonisés par une importante faune avicole. Les espèces représentées sont : *Acacia nilotica*, *Ziziphus mauritiana*, *Acacia seyal*, *Acacia ataxacantha*, *Mitragyna inermis*, *Boscia senegalensis*, *Balanites aegyptiaca*, *Pterocarpus lucens*, *Calotropis procera*, *Piliostigma rufescens*, *Adansonia digitata*, *Caparis corembosa*, *Acacia albida*, *Guiera senegalensis*, *Anageisus leocarpus* et *Combretum glutinosum*. Quelquefois, la surface de l'eau peut être recouverte de *Nymphaea lotus*.

L'abreuvement dans la mare se fait directement dans l'eau, en ce qui concerne le bétail, et le dépôt d'excréments transforme ces points d'eau en bourbiers quand le niveau de l'eau diminue. La population se ravitaille en utilisant des fûts ou des chambres à air, supportés par des charrettes tirées par des ânes. Cette eau est par la suite utilisée pour l'alimentation sans aucun traitement préalable.

L'utilisation de l'eau de mare permet une exploitation judicieuse et ordonnée des pâturages environnants et évite au troupeau la fatigue liée aux longs déplacements. Aussi, cette source d'eau est exploitée jusqu'à tarissement et souvent même à ce moment, les populations locales creusent des puisards pour accroître la durée d'exploitation de la mare. L'eau du forage n'est utilisée que lorsque toutes les mares sont taries. Cette utilisation optimale de l'eau de la mare se fait sans aucun souci d'ordre qualitatif et sanitaire, ce qui ne manque pas de se répercuter sur la santé humaine et animale.

2.6.3 Analyse de la qualité des eaux

L'étude de la contamination fécale est d'une importance particulière dans les pays en voie de

développement. La malnutrition, les mauvaises conditions d'habitat, en plus de la déficience de l'encadrement médical, expliquent l'ampleur sanitaire des maladies d'origine hydrique encore plus grande que dans le monde développé. À cela s'ajoute le climat qui semble plus favorable à la croissance de la flore microbienne. La diversité et la sévérité de ces maladies se ressentent surtout chez la population infantile.

Au Sahel, la rareté de l'eau provoque un congestionnement au moment de son utilisation. L'élevage transhumant se caractérise par un déplacement perpétuel de l'éleveur et du bétail à la recherche du fourrage et de l'eau. Cette eau est aussi bien utilisée à des fins d'abreuvement que pour l'alimentation et la satisfaction des besoins domestiques. La concentration du bétail autour des points d'eau est à l'origine de maladies d'origine hydrique.

2.6.3.1 Incidences sanitaires de la pollution provenant des animaux à sang chaud

L'eau polluée par les fèces des animaux à sang chaud, y compris l'homme, abrite de nombreuses bactéries et virus pathogènes appelés virus entériques. Plus de 100 types de virus sont excrétés dans les selles de l'homme et celles d'une personne infectée peuvent contenir jusqu'à plus d'un million de particules infectieuses par gramme. Les virus vivent dans l'eau, le sol et les aliments dont la contamination favorise la propagation des maladies virales (Anderson *et al.*, 1980), Bouédo *et al.*, 1991)

Les *entérovirus* de la famille des Picornaviridae disséminés par voie fécale sont responsables des troubles intestinaux et les *poliovirus* provoquent de graves troubles du système nerveux. Les virus *coxsakie* du groupe A et B sont responsables de la myalgie épidermique, de la polycardite chez les personnes âgées ou encore de la myocardite chez les nourrissons nés des mères infectées.

Les virus de l'hépatite A, non A, non B provoquent les hépatites. À ceux-là s'ajoutent les virus des maladies gastro-entériques dont le virus *Norwalk*. Les réovirus se retrouvent souvent dans les eaux de surface polluées et sont très pathogènes; les *rotavirus* sont identifiés comme principaux agents pathogènes (10^9 particules par gramme de selles d'une personne infectée)

qui provoquent des diarrhées infantiles non bactériennes à l'échelle du monde. Les virus des voies respiratoires ou *Adénovirus* infectent le tube digestif et sont évacués en grande quantité dans les selles, surtout chez les enfants. Ils sont responsables des épidémies pharyngo-conjonctivales associées à la fréquentation des piscines. Enfin parmi les *parvovirus*, les adénosatellites provoquent l'infection associée aux maladies respiratoires de l'enfance (OMS, 1979).

Parmi les bactéries pathogènes d'origine hydrique, il faut citer *Salmonellosis* responsable de salmonelloses. Les symptômes de ce type d'infection sont des diarrhées, vomissements, nausées, crampes abdominales et fièvre. On trouve *Salmonellosis* dans les eaux polluées, eaux stagnantes, eau d'irrigation, eau provenant des abattoirs. Les animaux infectés peuvent rejeter 10 millions de microorganismes par gramme de fèces (Will *et al.*, 1973). *Shigellosis* provoque aussi la diarrhée et une maladie de la prostate. On le trouve dans l'eau potable de mauvaise qualité ou dans les aliments contaminés. Il est surtout responsable des maladies endémiques. *Leptospirosis* pénètre par la peau et les muqueuses et atteint le système nerveux central. C'est un microbe transmissible à l'homme par les animaux domestiques. Plusieurs types de *E. coli* sont responsables de gastro-entérites avec comme manifestations diarrhées, déshydratation, atteinte de la prostate en l'absence de fièvre. *Entéropathogenis E. coli* est aussi responsable d'infections urinaires chez l'adulte. On le trouve dans les cours d'eau pollués par les fèces d'animaux à sang chaud. *Vibrion cholera* entraîne la diarrhée avec des selles liquides, des vomissements et même la rétention urinaire, une déshydratation, une baisse de la tension artérielle, une température subnormale et l'effondrement total peut survenir en quelques heures. Enfin *Tuberculosis* provoque l'infection des voies respiratoires (*T. pulmonae* se retrouve dans les eaux de baignade et de boisson) et *Mycobacterium*, celle de la peau (Mitchell, 1972; Reasoner, 1980; Bonde, 1977; Haudurcy, 1947; Larpent et Larpent-Gourgaud, 1970; Gyles, 1984).

2.6.3.2 Contamination des ressources hydrauliques au Sahel

L'eau de consommation contaminée représente un important facteur de diffusion de maladies.

À travers une hygiène personnelle imparfaite, le manque d'eau peut accroître les risques de transmission des maladies véhiculées par voies fécales et orales. L'eau peut également véhiculer les germes et les spores des maladies du bétail (Edwards *et al.*, 1988; Wanada, 1988; Guillaud, 1990). Parmi les affections bactériennes, les plus fréquentes sont dues au leptospirose et aux salmonelloses. La contamination de l'eau par les matières fécales entraîne aussi la présence de parasites (protozoaires, trépanatodes, nématodes), car elle permet la prolifération d'hôtes intermédiaires tels que les mollusques et les insectes piqueurs (Serres, 1980). Le milieu humide est un cadre favorable à la survie et à l'évolution des oeufs de parasites, ce qui provoque l'infestation d'un grand nombre d'animaux. Parmi les nématodes les plus importants sont les *strongyloses* qui, en s'incorporant dans la boue, y évoluent dans les meilleures conditions. Au Sahel, les *strongyloses* provoquent des maladies de saison des pluies car les animaux se contaminent facilement en buvant l'eau des flaques (Serres, 1980). *L'ascaridose*, parasite fréquent autour des points d'eau, est la cause d'une mortalité élevée chez le veau.

Les maladies diarrhéiques comme le choléra apparaissent régulièrement dans le Sahel sénégalais surtout durant la saison des pluies où ils ravagent des populations chaque année. Dès lors, il apparaît important de vérifier les critères de potabilité de l'eau.

2.6.3.3 Indicateurs de pathogénéicité

La potabilité de l'eau est évaluée à partir de paramètres chimiques et bactériologiques. Pour désigner les impuretés de l'eau qui sont provoquées par les matières fécales et les produits de putréfaction, on mesure la teneur en ammonium. Les orthophosphates sont aussi des indicateurs de pollution chimique. Quant à l'analyse bactériologique, elle a consisté à rechercher des indicateurs de pathogénéicité. La recherche virale requérant des techniques pointues et coûteuses, elle est habituellement remplacée par la recherche d'indicateurs bactériens de leur présence; ce sont généralement les coliformes et les streptocoques. Leur présence en grand nombre dans l'eau indique celle de virus pathogènes (Bancroft *et al.*, 1989; Bergenstein *et al.*, 1992; Burn et Bean, 1987; Canale *et al.*, 1973; Burge *et al.*, 1981; Couillard, 1981 ; Couillard et Lefebvre, 1985; Dubecco et Ginsberg, 1917, Duffour *et al.*,

1981; Gannon *et al.*, 1983; Geldreich *et al.*, 1962; Kott, 1981; Lattanzi et Mood, 1951; Matthews, 1980; Reasoner, 1980; Santiago-Mercado et Hazen, 1987; APHA, 1981).

2.6.3.4 Méthodologie d'analyse

Analyses chimiques

Le phosphore et l'ammonium ont été tous les deux détectés par la méthode colorimétrique. Pour le premier, la présence des orthophosphates est signalée par la formation d'acide molybdophosphorique lors de l'ajout du molybdène d'ammonium et, par la suite, la réduction à l'aide d'une solution de chlorure stanneux forme une solution de coloration bleue. Au bout de deux minutes, la couleur de l'échantillon est comparée à celle d'une série de tubes contenant des solutions phosphatées de différentes concentrations et l'intensité de la coloration est directement proportionnelle à la concentration d'orthophosphate dans l'eau.

L'azote ammoniacal de son côté est détecté par le réactif de Nessler qui est une solution d'iodide de mercure très alcaline. Ce réactif développe une couleur jaune en présence d'ammonium. Le résultat est obtenu au bout d'une minute.

Analyses bactériologiques

Les coliformes totaux et fécaux appartiennent à la famille des Entérobactériacées. Ce sont des bactéries gram-négatives aérobiques ou facultativement anaérobiques qui ne sporulent pas dans les conditions naturelles et qui sont capables de fermenter rapidement le lactose avec production de gaz au bout de 48 heures à 35° C. Le sous-groupe des coliformes fécaux se particularise par la production de gaz à une température d'incubation de 44,5° C (Payment & Sanchez, 1990).

Les Streptocoques comprennent à la fois des espèces entérococciques et non entérococciques. Parmi ces dernières *S. bovis* et *S. equinus* se trouvent exclusivement dans les matières fécales des animaux.

Les entérocoques sont des bactéries gram-positives de grandes dimensions, ovoïdes, qui se

présentent généralement en chaînes. Leur croissance s'effectue à des températures variant entre 10 et 45° C. Ils survivent à une exposition à 60° C pendant 30 minutes et se développent aussi à un PH de 9,6 et dans les solutions NaCL à 6,5%. Ce sous-groupe comprend *S. faecium* et *S. faecalis* qu'on trouve en quantités considérables dans les fèces humains et animaux tandis que *S. avium* et *S. gallinarium* se retrouvent particulièrement dans les fèces d'oiseaux.

En raison de l'éloignement des lieux de prélèvement des grands centres urbains où sont localisés les laboratoires d'analyse de l'eau, de telles analyses ne sont fiables que lorsqu'elles sont effectuées sur le terrain, vu les conditions du milieu, en particulier la température favorable à la croissance des bactéries. Aussi, les échantillons ont été conservés à 4° C et analysés dans les deux heures qui ont suivi leur prélèvement. Ceci a été possible grâce à l'utilisation d'un matériel de terrain comprenant des boîtes de Pétri, un matériel de filtration, des milieux de culture et un incubateur portatif. La méthode utilisée est celle de la membrane filtrante. Elle permet de compter directement les bactéries après incubation. Son avantage réside dans l'économie de temps, d'espace, la rapidité et la facilité des examens et, enfin, leur degré de reproductibilité, mais surtout la possibilité d'effectuer les analyses sur place à l'aide d'un équipement portatif.

- les coliformes totaux: après prélèvement et filtration, la membrane filtrante est placée sur le milieu MEndo contenant du lactose, des protéines digestives, des vitamines, des produits chimiques sélectionnés et le réactif de Schiff. Elle sera incubée pendant 24 h à la température de 35° C. En plus de fermenter le lactose, les coliformes produisent au cours de leur multiplication un acide: le complexe aldéhyde qui se combine au réactif de Schiff pour recouvrir les colonies en croissance d'un manteau vert iridescent. Ainsi, elles seront identifiées comme les colonies d'un rouge sombre avec un éclat verdâtre-doré.

- les coliformes fécaux: leur milieu de culture est le MFC contenant du lactose, des protéines digestives, des vitamines, des produits chimiques sélectionnés ainsi qu'un colorant à base

d'aniline. La membrane est incubée pendant 24 h à 44,5°C, température permettant seulement aux coliformes fécaux de se multiplier. En fermentant le lactose, les coliformes produisent un acide qui réagit avec le colorant à base d'aniline pour donner aux colonies une couleur bleue.

- les streptocoques fécaux: leur analyse s'est faite en laboratoire en utilisant un milieu de culture KF. L'incubation dure 48 h à la température de 35 ° C. Les colonies s'identifient à leur couleur rouge ou carmin.

2.6.3.5 Résultats des analyses de la qualité de l'eau

La forte turbidité entravant la lecture correcte des résultats des analyses chimiques sur le terrain, il a fallu procéder au laboratoire à une précipitation des suspensions avec l'hydroxyde d'aluminium, puis à une filtration de l'échantillon avant d'évaluer le taux d'ammonium et de phosphore. La présence de l'ammonium dans l'eau peut entraîner le développement de certains germes donnant des goûts désagréables. L'absence de phosphore dans l'eau de mare constitue un résultat bizarre et pourrait être attribuée à un phénomène d'interférence qui aurait nui au développement de la couleur. Cela montre également les limites des analyses de terrain qui, bien qu'indicatrices de la situation qui existe, n'égalent pas les recherches au laboratoire.

La multiplicité des usages de l'eau de mare, unique source d'approvisionnement de la population et du troupeau, et l'absence de mesures d'hygiène quant à son utilisation sont à l'origine d'une forte pollution chimique et bactériologique (tableau 8 à 11). Les résultats des analyses chimiques ou bactériologiques dépassent de loin les normes requises quant à la potabilité de l'eau. Les qualités exigibles d'une eau non traitée sont habituellement de zéro streptocoque fécal dans 50 ml et zéro coliforme fécal dans 100 ml. Le taux de pollution est beaucoup plus élevé au niveau des mares que du forage. Il atteint des proportions alarmantes. L'importance des CT s'explique par leur capacité de se reproduire dans l'eau surtout en présence d'éléments nutritifs; c'est pourquoi il est préférable de se servir des CF.

La fréquentation massive des points d'eau (particulièrement les mares en saison des pluies)

forage	phosphore (mg/l)	ammonium (mg/l)
Mbididi	0	0,4
Namarel	0	0,15
Yaré	0	0,10
Labgar	0	0,25

Tableau 8 : Résultat des analyses chimiques de l'eau de forage

Mare	phosphore (mg/l)	ammonium (mg/l)
Wendu Yaré	0	450
Mbelkoum	0	300
Loumbol Thill (petite)	0	425
Loumbol Thill (grande)	0	350
Bourma	0	375
Bourma	0	250
Loumbi nelli	0	300
Lédème	0	400
Céterma	0	500

Tableau 9 : Résultat des analyses chimiques de l'eau de mare

Forage	CT / 100 ml	CF / 100 ml	SF / 50 ml
Mbiddi	> 2000	0	100
Namarel	> 2000	> 2000	0
Yaré	> 2000	0	50
Labgar	> 2000	> 1000	0

Tableau 10 : Résultat des analyses bactériologiques de l'eau de forage (coliformes totaux(CT), coliformes fécaux (CF), streptocoques fécaux SF)

Mare	CT / 100 ml	CF / 100 ml	SF / 50 ml
wendu yaré	> 2000	> 2000	850
wendu mbelkoum	> 2000	> 2000	0
loubol thill (1)	> 2000	> 2000	300
loubol thill (2)	> 2000	> 2000	50
bourma (grande)	> 2000	> 2000	850
bouma (petite)	> 2000	0	0
loubi nelli	> 2000	200	100
wendu lédème	> 2000	> 2000	50
w. Lédème (petite)	-	> 2000	-
wendu kéléli	-	> 2000	0
wendu céterma	> 2000	> 2000	50
loubi diwi (petite)	-	> 2000	-
w. Mbagoudobé	> 2000	-	-
wendu diahel	-	> 2000	-
windé mawnu	-	> 2000	-
wendu thiwdé	-	1400	-
loubol carrière	-	1900	-
l. Mamaniakré	-	> 2000	-
loubol kadione	-	1700	-

Tableau 11 : Résultat des analyses bactériologiques de l'eau de mare

par le troupeau qui y accède librement, sans aucune forme de contingentement, explique la turbidité de l'eau qui, en plus des particules argileuses du sol, comportent d'importantes quantités de fèces.

L'échantillonnage des eaux de forage a été effectué au niveau du bassin, pour Labgar et Namarel et au niveau du robinet concernant les forages de Yaré et Mbiddi. Ceci expliquerait le nombre élevé de CF dans les deux premiers forages, alors qu'on note leur absence dans les deux derniers. Les bassins à ciel ouvert peuvent être contaminés par les particules soulevées par le vent. De plus, le puisage de l'eau se fait par l'utilisation de tuyaux en caoutchouc que les populations locales plongent dans le bassin d'un bout, alors que l'autre extrémité par laquelle sort l'eau est placée dans une chambre à air pour puiser l'eau destinée à la consommation humaine, à celle du petit bétail et aux besoins domestiques. Malheureusement après ce puisage, ces tuyaux sont jetés à terre et peuvent véhiculer les bactéries qui se trouvent dans les flaques d'eau autour du bassin, flaques d'eau contaminées par les fèces des ânes, animaux de traction utilisés pour l'approvisionnement d'eau en saison humide. Ce phénomène certainement s'amplifie au cours de la saison sèche quand l'afflux de bétail est plus important. Les travaux de Edwards *et al.*, (1980) ont abouti à la même constatation: les eaux souterraines présentent normalement une excellente qualité bactériologique à cause de la protection, généralement très efficace, que confèrent les sols aux formations aquifères. On assiste toutefois, à une contamination locale de la source d'eau souterraine, lorsque les mesures prises pour empêcher l'intrusion d'eaux de surface souillées autour du tubage des forages ou du cuvelage des puits, s'avèrent inefficaces.

En résumé, du point de vue botanique, le Ferlo septentrional dispose d'une végétation assez diversifiée d'une valeur bromatologique classée moyenne à bonne, et dont le court cycle représente une bonne adaptation aux conditions d'humidité qui sévissent dans la zone. Cette végétation est fort appréciée du cheptel. En année de bonne pluviométrie, la production primaire du Ferlo peut assurer l'autosuffisance alimentaire du bétail; les mares sont très nombreuses et assurent la couverture des besoins durant cette période, mais la qualité de

l'eau représente une limite à son exploitation, vu les nombreuses maladies d'origine hydrique qui surviennent; toutefois, le problème qui se pose est de savoir comment gérer le potentiel, disponible à la fin des pluies, durant la longue saison sèche quand la production végétale est interrompue et que la seule ressource hydrique devient celle en provenance du forage, car c'est la présence d'eau pour abreuver le bétail qui détermine les pâturages qui peuvent être utilisés. L'amélioration de l'élevage ne peut passer que par une bonne gestion des parcours naturels.

Celle-ci doit être envisagée conjointement en terme de ressources hydriques et végétales et doit englober aussi bien un aspect quantitatif que qualitatif. Le développement de l'élevage est freiné par l'absence de contrôle des autorités locales sur l'eau et les pâturages. Hormis l'ignorance des ressources à la portée des populations pastorales, l'intervention des décideurs est annihilée par une mauvaise maîtrise des facteurs socio-économiques.

2.7 Étude socio-économique

2.7.1 La structuration de l'espace pastoral

Traditionnellement, le principe d'utilisation de l'espace pastoral était fondé sur la distinction entre les zones dites de *jey* et de *ladde*. Les *jey* correspondent aux milieux physiques les plus favorables. Elles étaient aussi nommées "zones de vie et les seules zones habitées" (Grosmaire, 1957). Les *ladde* correspondent, quant à elles, aux espaces interstitiels séparant ces *jey*, c'est-à-dire à la brousse, à la nature, "un espace qui appartient à tous et dont l'exploitation ne fait l'objet d'aucune réglementation particulière" (Touré, 1987). Les *jey*s par contre étaient soumis à une juridiction du droit coutumier. Ils se subdivisaient en *hurum*, le terme désignant les territoires agro-pastoraux rattachés aux campements d'hivernage. "La gestion de l'espace agro-pastoral se fonde sur le respect du *hurum* c'est-à-dire des interdits édictés en matière d'utilisation de parcours et des terrains de culture. Le *hurum gese* désigne l'interdit des champs et le *hurum durungal* l'interdit des pâturages". (Touré, 1987). L'élaboration du *hurum gese* répond au souci de préserver les cultures contre la divagation du bétail; les champs étant regroupés en bloc, il était facile de les éviter en envoyant le troupeau paître dans une direction opposée. L'application de cette juridiction cessait donc avec les récoltes. Le *hurum durungal*, en réservant les zones de parcours du bétail du campement, empêche les conflits qui pourraient survenir en cas de divagation ; le bétail s'habitue au parcours et ne fait l'objet d'aucune surveillance. Ces deux systèmes étaient décrétés par le chef de terre ou premier occupant qui décidait de l'emplacement des *galleeji* dans le *hurum* et donnait l'autorisation à tout nouvel arrivant de s'implanter sur le *hurum*. Un tel système de gestion permettait à l'éleveur d'avoir une parfaite maîtrise de son environnement et devait sa réussite à l'effectif raisonnable du bétail. Avec l'avènement des forages et l'amélioration des conditions sanitaires, on assiste à l'abandon du système *hurum*.

2.7.2 La modification des pratiques pastorales

La perte du droit coutumier a détourné l'intérêt des éleveurs vers l'eau et la végétation, la terre n'ayant plus de signification. En l'absence de règles régissant l'exploitation des parcours, chaque individu cherche à satisfaire ses besoins personnels, sans aucun souci de préservation

des ressources naturelles. Avec les forages, on assiste au déclin des grandes transhumances. Les éleveurs séjournent dans leur campement d'hivernage jusqu'à la dégradation des parcours exploités par le cheptel qui intervient après une durée d'exploitation de 5 à 10 ans. Alors ils se déplacent vers un autre site, toujours situé dans la zone de desserte du forage. Actuellement, la gestion des parcours d'hivernage est identique à l'époque précédant l'existence des forages. Certains éleveurs, qui disposent de droits particuliers dans des territoires lointains, effectuent des migrations de grande amplitude à la fin de cette saison. Ce sont, par exemple, ceux de Yoli qui disposent de champs ancestraux à Ndioum et qui transhument avec leur bétail jusqu'à la récolte du mil. C'est le cas également des villageois de Mbélogne et Kadione qui pratiquent dans le même secteur une culture de décrue. Les habitants de Rindo cultivent le riz à l'est de Hairé dès l'assèchement de leur mare laissant le bétail sur place. Les éleveurs se déplacent suivant les saisons selon la disponibilité du fourrage et de l'eau.

2.7.3 La mobilité du cheptel

a) en saison pluvieuse : durant cette saison appelée *ndungu* et qui s'étend de juillet à septembre, la disponibilité de l'eau, du pâturage et des champs implique une faible mobilité qui permet l'exercice des activités agro-pastorales. Le bétail s'abreuve aux mares et exploite les pâturages de la zone attenante au *rumaano*. Les allées et venues quotidiennes se passent dans un rayon d'environ 5 km.

b) en saison sèche : dès l'arrêt des pluies au mois d'octobre, la plupart des mares tarissent et l'herbe commence à s'assécher. C'est la saison sèche fraîche appelée *kawle* (octobre - novembre). En l'absence de mare, les éleveurs se replient vers les mares des villages environnants ou vers le forage. Les parcours naturels font l'objet d'un libre accès à tous les troupeaux quelque soit leur origine. Ainsi le village de Mbelkoum, jouissant de la présence de l'une des plus grandes mares, l'une des dernières à se tarir dans la zone, fait l'objet d'un attrait particulier. Il reçoit des transhumants pendant deux mois. Ceux-ci proviennent des villages environnants de Guinte, Gassel diangalabe, Lotji gopadi, Keur amat silley, Bambado,

Wuro samba tjile, Demba laamu Diallo et Rindo. Ce sera seulement après le tarissement de cette mare que tous se dirigeront vers le forage. La fraîcheur de cette saison permet aux troupeaux de s'abreuver un jour sur deux au forage. Ce retour au forage se maintient durant la saison chaude (*ceedu*) qui dure jusqu'en mars et devient très difficile à sa fin (*deminaare*). Le rythme d'abreuvement durant la longue saison sèche dépend de la proximité du forage. Ainsi les habitants de Mbelkoun situé à 3 km seulement de Yaré peuvent s'y rendre chaque jour. Ceux de Loumbogne barode iront au forage de Mbiddi deux jours sur trois. D'autres éleveurs abreuveront leur troupeaux un jour sur deux ou sur trois. Au cours du *kawle*, le bétail exploite les pâturages situés entre le forage et le campement le jour de l'abreuvement et ceux qui observent un jour de jeûn l'utilisent pour accéder à des pâturages plus riches situés à des dizaines de kilomètres de leurs campements. Le *ceedu* est reconnu comme étant la période la plus difficile; on y observe un amenuisement progressif des ressources fourragères autour des campements et des points d'eau et les éleveurs se plaignent constamment d'une période de soudure appelée *tjercele* ou *deminaare* qui correspond à la toute fin de cette saison et à l'attente des premières pluies de l'hivernage. Durant cette période, toute l'herbe est broutée sur un rayon parfois de 15 à 20 km, les feux de brousse sont fréquents et à la difficulté de rapprocher l'eau du fourrage vient se greffer la présence de transhumants venus du nord qui entraîne un effet de surpâturage. L'alimentation du bétail est alors complétée par l'ingestion de graines de coton et de tourteaux. Malheureusement cette solution s'avère peu efficace vu le nombre d'animaux. Cette période de soudure est due à un manque de moyen de stocker l'herbe et à l'absence de puits.

Cependant, le phénomène de transhumance est surtout important au cours de la saison sèche. Le plus souvent, ce sont les habitants de la vallée du fleuve Sénégal (*walo*) qui envahissent le Ferlo du fait que l'hivernage se termine plus vite au Nord et à cause de la dégradation de plus en plus prononcée de l'environnement dans cette zone. Certaines de ces populations viennent avec leurs charrettes chercher du foin jusqu'à Yoli. Ils arrivent des villes de Dagana, Ndioum, Thille Boubacar, Richard Toll, Podor, Louga, Saint-Louis et Guédé. Parfois au coeur de la saison sèche, les transhumants viennent consommer tout le fourrage disponible

laissant les éleveurs locaux totalement démunis, au point que parfois, ils sont obligés à leur tour de transhumer.

Les transhumances exceptionnelles

Elles sont attribuées à un déficit fourrager en saison sèche. Plusieurs causes sont indiquées : la péjoration du climat, le surpâturage dû à la présence de transhumants, les feux de brousse et les pannes de forage. Ces déplacements s'accompagnent de la nomadisation de tout ou une partie de la famille et du troupeau. Ce sont des mouvements de grande amplitude (sur des centaines de km), dirigés vers le sud et l'est du Ferlo. Ils sont devenus pratique courante dans certains villages où l'on évoque pour cause la sécheresse. Le plus souvent, les éleveurs partent au cours de la saison sèche et reviennent dès les prochaines pluies. En cas de sécheresse comme en 1984, ils peuvent rester plus longtemps, jusqu'à quelques années dans leurs zones d'accueil. Le déplacement dans l'aire de desserte des forages voisins s'effectue surtout en cas de panne et de déficit fourrager.

La conduite du troupeau

Les travaux de Touré (1990) ont confirmé le résultat de nos enquêtes comme quoi la conduite des troupeaux répond beaucoup plus à un souci de sécurité (égarement, attaques par les fauves, voleurs) qu'à la volonté de suivre de près l'alimentation du bétail et d'en assurer le guidage en fonction d'objectifs de production clairement définis. Les petits ruminants sont conduits et surveillés au pâturage pendant toute l'année. La nuit, seuls les bovins vont paître. Certains font l'objet de surveillance jusqu'à trois km environ pour éviter le piétinement des champs; d'autres déjà habitués au chemin, ou paissant dans des zones qui ne sont pas fréquentées par des animaux sauvages, sont laissés à eux-mêmes (cas de Rindo). Le gardiennage est l'oeuvre des enfants, de quelques adultes célibataires ou sans enfant ou encore de salariés. De manière générale, la pratique du gardiennage tend à disparaître, ce qui rend nulles les pratiques de conduite adoptées dans le passé. "Il s'en suit un manque d'intérêt des pasteurs pour les pâturages et la conduite de l'alimentation des animaux; ceci ne manque pas de se répercuter négativement sur la productivité de l'élevage" (Touré, 1990).

2.7.2 Influence des disponibilités hydriques et végétales sur la physiologie du bétail et le rythme d'exploitation des parcours

Le comportement du pasteur, en ce qui concerne la conduite de son troupeau, doit être lié à l'eau et au fourrage. L'eau constitue l'élément prépondérant du système pastoral. La tendance à l'aridité fait de cet élément la préoccupation majeure des pasteurs. L'activité pastorale ne peut s'exercer sans eau, encore faudrait-il que cette eau soit répartie adéquatement par rapport aux ressources fourragères. Le problème de l'eau au Sahel se pose en terme de quantité et de qualité. Le total pluviométrique, sa répartition interannuelle et intermensuelle conditionnent l'abondance ou le déficit fourrager. La sécheresse induit une transformation du milieu notamment dans la composition floristique du tapis végétal. Les espèces dont les besoins en eau sont élevés disparaissent au profit d'autres, plus résistantes, mais souvent de qualité fourragère médiocre. La disponibilité du fourrage et sa répartition vont définir les mouvements du bétail, en plus de cet élément eau. Enfin l'alimentation du cheptel et les conditions d'abreuvement ont un effet sensible sur le métabolisme. Le régime physiologique du troupeau est calqué sur le rythme de fourniture énergétique ou azotée des pâturages. En fonction des saisons, on assiste à deux panoramas opposés :

- en saison des pluies, l'herbe est tendre et appétable; les animaux gagnent du poids et produisent beaucoup de lait;

- en saison sèche, l'amenuisement des ressources et leur dépréciation (lignification et fructification des graminées) limitent le broutage préférentiel et se répercutent sur l'état général des animaux; on observe une baisse de productivité (état d'embonpoint, fécondité). Le stock fourrager ne parvient plus à assurer la ration d'entretien en matières azotées, c'est la "période des maigres". Les pâturages sont de plus en plus éloignés et de plus en plus pauvres avec des carences nutritionnelles, énergétiques, protéiques et en oligo-éléments. Les plus fragiles (vieilles et jeunes vaches) meurent souvent d'inanition. La misère physiologique entraîne une baisse de production, une perte de poids et des retards de croissance chez les jeunes, des capacités de reproduction marquées par de fréquents avortements. À cause de

l'inégale répartition des ressources dans le temps, la ration animale est difficile à équilibrer. Or le but de l'élevage étant la commercialisation de viande et la production laitière, la consommation d'eau est primordiale.

La rationalité de l'éleveur peut être définie comme la recherche de la maximisation du profit tiré de l'élevage que ce soit dans un but monétaire ou de sécurité alimentaire. Elle est fonction de la qualité et de la quantité de l'eau et du fourrage. La rationalité de l'éleveur doit donc être de conduire son troupeau en fonction de la quantité et surtout de la qualité du pâturage, mais aussi de la position de ce pâturage par rapport à l'eau. La recherche et le choix des espèces végétales sont déterminés par :

- la présence de plantes fortement appréciées et de leur stade phénologique : l'animal a une capacité sélective qui dicte le choix de l'espèce consommée. Les bovins et les ovins préfèrent les herbacées, avec cependant une exploitation plus importante des légumineuses chez les ovins. Les espèces les plus recherchées étant alors *Zornia glochidiata*, *Alisicarpus ovalifolius* et *Indigofera sp.* Parmi les herbacées, les graminées hautes sont délaissées dès qu'elles atteignent le stade d'inflorescence ou lorsqu'elles sont asséchées; dans le dernier cas, elles s'accrochent aux gencives du bétail.

- la hauteur et la densité de l'herbe : les graminées hautes (*Cenchrus biflorus*, *Eragrotis tremula*, *Chloris priouri*, *Tragus racemosus*, *Chenopodia gracilis*, etc...) couvrant des formations denses surtout en zone dunaire deviennent difficiles à traverser au cours de la saison des pluies. De plus, ils piquent les yeux du bétail à cause de la présence de nombreuses épines. Cela explique que, le plus souvent, elles sont exploitées en dernier après piétinement par le bétail.

- la qualité de l'herbe : les légumineuses constituent, en général, un tapis herbacé plus tendre, plus succulent et plus nourrissant. Elles entraînent un meilleur engraissement et une production laitière plus importante.

- la localisation du fourrage : l'exploitation du pâturage se fait également suivant le type de sol et la disponibilité de l'eau sur ce sol. De manière générale, le sol du *seno* étant plus léger, l'herbe y croît très vite, ce qui pousse le bétail à l'exploiter dès l'apparition des premières pluies. Toutefois, l'absence de mares sur ce *seno* l'oblige à aller s'abreuver dans le *baljol*. Quand le *baljol* se couvre à son tour d'herbe, le cheptel a tendance à s'y replier, jouissant alors à la fois de la proximité de pâturage et d'eau. Cette situation n'est possible que si les pluies sont régulières, car leur arrêt précoce entraînerait un flétrissement du tapis herbacé, mortel pour le bétail. En cas de pluviosité abondante, le sol du *baljol* très marécageux provoque l'engorgement du cheptel et la présence d'insectes piqueurs contribue à éloigner le bétail qui se sent plus à l'aise sur un *seno* mieux aéré et fourni. Toutefois, dès l'arrêt des précipitations, le bétail part à la recherche de l'herbe de qualité présente dans le *baljol* et l'exploite jusqu'à épuisement. Après quoi les éleveurs reviennent sur le *seno* où les espèces graminéennes hautes sont enfin consommées. Leur taux d'humidité est encore important au début de la saison sèche et on note la présence d'espèces comme *Colocynthis vulgaris*, très riche en eau. Durant la période de soudure (transition entre saison sèche et saison des pluies), alors que tout le fourrage est consommé, la part des ligneux devient très importante dans l'alimentation du bétail. Ils sont surtout exploités dans le *baljol* où leur tapis végétal est plus dense.

2.7.3 Distribution spatiale des ressources végétales et hydriques

Parti de la situation "des pâturages, pas d'eau", le Sahel est arrivée à "de l'eau, pas de pâturage" (Freunteun, 1955, cité par Touré, 1987). En effet, si l'hydraulique pastorale a permis l'exploitation de pâturages jadis délaissés par les pasteurs à cause de l'absence de points hydriques, l'implantation des forages, en fournissant une source d'eau permanente, a tout de même déstabilisé l'écosystème. Aussi "l'hydraulique pastorale ne doit pas être abordée en terme d'insuffisance en eau, mais en terme d'équilibre entre les ressources en eau et en pâturage" (Thébaud, 1990). Les ressources en eau n'ont d'importance que par leur répartition par rapport au fourrage. Sans pâturage aux alentours d'un point d'eau, ce dernier n'est utilisé que pour la consommation humaine, le bétail n'y ayant pas accès. Par contre, un pâturage sans point d'eau est également difficile d'accès pour les animaux. La gestion de l'eau au Sahel

est surtout rendue difficile par le caractère saisonnier de cette ressource. Traditionnellement les stratégies de gestion de l'espace reposaient sur la mobilité au cours de la saison des pluies. Aujourd'hui, aux déplacements concentriques axés autour des mares de cette saison se juxtaposent ceux ayant lieu autour des forages en saison sèche.

En résumé, l'étude des données socio-économiques révèle une profonde modification des pratiques de gestion des parcours. Jadis réglementées, ces pratiques sont de nos jours individualisées et sans souci de préservation de l'environnement. L'absence de gardiennage, le manque de suivi de l'alimentation du cheptel et la tendance à la sédentarisation suite à la création des forages se répercutent fortement sur la productivité de l'élevage et sur le milieu naturel fortement dégradé.

Synthèse du chapitre

L'approche conventionnelle a permis de mettre en lumière les causes de la déficience du système pastoral sénégalais. Parti de facteurs physiques peu favorables, l'élevage connaît une crise aggravée par des techniques de gestion mal adaptées. La méconnaissance des ressources hydriques et fourragères et leur caractère saisonnier constituent les principales difficultés pour l'amélioration de leur productivité et la préservation de l'écosystème. L'inventaire des points d'eau est capital pour leur gestion et leur assainissement est une condition essentielle à la couverture des besoins sanitaires et à l'amélioration de la productivité pastorale. Toute tentative de proposition d'une gestion améliorée des parcours naturels doit se baser sur la cartographie des ressources naturelles, leur évaluation quantitative et qualitative et sur l'intégration de tous les facteurs relatifs à leur gestion. La télédétection constitue à ce titre un nouveau moyen d'estimation de la production végétale dont la contribution par rapport aux méthodes traditionnelles est de fournir un document cartographique. L'acquisition de données répétitives est particulièrement adaptée au suivi de l'environnement d'un point de vue spatio-temporel.

3 APPROCHE PAR TÉLÉDÉTECTION

3.1 Pourquoi utiliser la télédétection ?

Les techniques d'échantillonnage terrestres fournissent des données ponctuelles, figées dans le temps et difficilement extrapolables. Les cartes de pâturages qui couvrent la zone d'étude sont anciennes et ne font pas l'objet de réactualisation. L'échelle à laquelle elles ont été réalisées (1/200.000; 1/ 500.000) ne permet pas de fournir une information assez détaillée. Les images satellites, du fait de leur répétitivité, permettent plus aisément de suivre l'évolution du paysage végétal. Cela est un fait capital dans ce Sahel où les ressources naturelles varient dans le temps et dans l'espace. Elles offrent la possibilité d'un support visuel réactualisable. La quasi-absence de points géodésiques dans l'immense Ferlo dicte l'utilisation du GPS pour obtenir les coordonnées précises des points d'eau et des villages, d'autant plus que les cartes topographiques existantes mentionnent à peine leur présence. Les photographies aériennes, à l'échelle de 1/50.000 par la vision stéréoscopique qu'elles offrent, permettent de cartographier le relief et partant de localiser les dépressions, réceptacles des mares de la saison des pluies. La texture du sol et sa réflectance permettent également d'isoler les différentes unités pédologiques. L'utilisation de la télédétection répond donc à un souci de pallier au manque de données relatives à l'environnement pastoral et à la mise à jour régulière de ces données par la cartographie.

3.2 Application de la télédétection au Sahel

L'apparition et le développement des techniques de télédétection ont largement contribué au suivi de l'environnement et à la gestion des ressources naturelles à l'échelle du globe. Une des principales applications de cette technologie spatiale, qui s'est révélée d'un grand intérêt pour l'Afrique notamment dans sa partie septentrionale, est l'inventaire, la cartographie et le suivi des formations végétales (Prince, 1991; Prévost, 1990; Tricart, 1976; Kaufman et Holben, 1993; Holben, 1986; Chong, Mougín et Gastellu-Etchegorry, 1993). L'étude du dynamisme de la couverture végétale a conduit à la mise en évidence de la désertification au Sahara (le Houérou, 1989) et à l'aménagement agricole (Iro *et al.*, 1989). Au Sénégal, les travaux du Centre de Suivi Écologique (CSE) ont pu apporter une dimension nouvelle dans

l'évaluation de la production primaire au Ferlo par l'introduction du traitement de données satellitaires à faible résolution spatiale (NOAA), utile dans la cartographie de la biomasse disponible à l'échelle du pays à la fin de la saison des pluies. L'utilisation de la télédétection pour la gestion de l'eau au Sahel commence à se développer (Traoré *et al.*, 1993). La localisation des points d'eau et leur suivi ont été réalisés par Kouda qui a procédé à leur cartographie au mois de décembre avec des images Landsat en Haute-Volta (Kouda, 1981). Au Sénégal, l'utilisation de données de télédétection pour étudier le milieu pastoral se limite à l'évaluation de la production primaire et à la cartographie des feux de brousse. La dimension des mares et la difficulté de leur identification représentent des limites quant à l'utilisation de cette technique. Les vols systématiques de reconnaissance (VSR) du CSE sont d'un grand apport dans le dénombrement du cheptel; ils produisent des données plus fiables que celles de la Direction de l'élevage qui se base sur un comptage du bétail au moment des campagnes de vaccination. Malheureusement, ces vols ne sont pas réalisés de façon régulière.

3.3 Traitement des données de télédétection

3.3.1 Intégration des données satellitaires et des données de terrain

Les images de télédétection ont été utilisées pour le calcul de l'indice de végétation en vue de l'élaboration de la carte de biomasse et pour la cartographie des champs. Afin de minimiser les facteurs qui peuvent influencer la réponse spectrale des végétaux (interaction sol-végétation, humidité du sol, couleur et effets de l'environnement), plusieurs indices ont été utilisés. L'exploitation des relevés de terrain a permis d'obtenir la production de matière sèche à l'hectare au niveau de chaque site. Cette production a été corrélée avec ces divers types d'indices de végétation calculés à partir de l'image de saison de pluie.

3.3.2 Calcul des indices de végétation

Le NDVI ou Normalised Differenced Vegetation Index est calculé par la formule suivante : proche infra-rouge moins rouge sur proche infra-rouge plus rouge :

$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$. Il présente l'avantage de décrire les variations de la

végétation malgré les effets atmosphériques (Kaufman, 1984; Fraser et Kaufman, 1985). Son inconvénient est d'être sensible à la géométrie d'éclairement et de visée, notamment pour les couverts à faible densité. Lorsque le couvert végétal est dispersé, il y a une augmentation significative des radiations dans le rouge à cause de la surface du sol et une diminution dans le PIR (Guyot, 1984; Huète *et al.*, 1984, Huète, 1985 et 1987; Heilman et Kress, 1987; Diallo *et al.*, 1991; Frederiksen, 1992).

En 1988, Huète a développé le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) dans le but de décrire le système sol - végétation en tentant de minimiser l'effet du sol sous-jacent sur le NDVI (Huète, 1988) :

$$\text{SAVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R} + \text{L}) * (1 + \text{L})$$

L étant un facteur d'ajustement indépendant du sol ou du capteur; quand L = 0, SAVI = NDVI.

Pour tenir compte du fait que le sol est sec ou humide ainsi que de l'angle d'inclinaison solaire, Qi *et al.*, (1993) et Qi *et al.*, (1994) ont développé le MSAVI (Modified Soil Vegetation Index), défini par :

$$\text{MSAVI} = 2 * \text{PIR} + 1 - [0,5 * (2 * \text{PIR} + 1)^2 - 8 * (\text{PIR} - \text{R})]^{0,5}$$

Baret et Guyot (1991) ont également introduit dans le même ordre d'idées, le "Transformed Soil Vegetation Index" (TSAVI). Ce dernier se détermine par rapport à la droite des sols selon la formule :

$$\text{TSAVI} = [a * (\text{PIR} - a * \text{R} - b) / [(R + a * \text{PIR} - a * b + X * (1 + a^2))]]$$

où a et b sont les paramètres de la droite des sols. Cet indice est nul dans le cas des sols nus et s'approche de 0,7 pour les couverts végétaux très denses.

3.3.3 Régression entre l'indice de végétation et la biomasse au sol

Plusieurs indices basés sur le rapport des canaux du rouge et de l'infra-rouge ont été testés. Leur utilisation n'a pas montré une différence notable dans leur régression avec la production

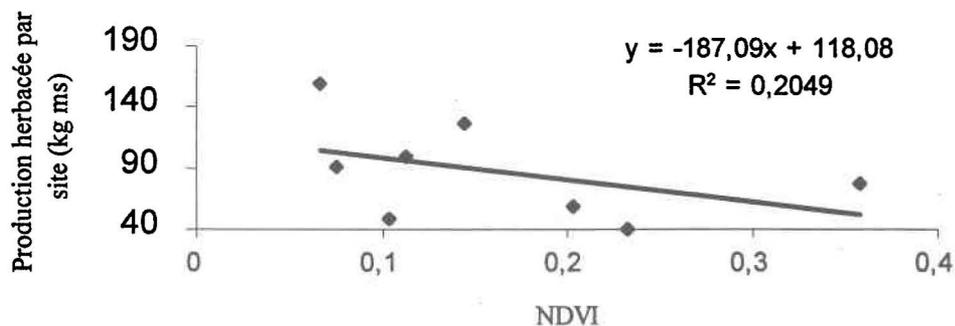
végétale au sol. De façon générale, les coefficients de régression obtenus ne sont pas excellents; cela pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs :

- l'utilisation d'une image à haute résolution dans une zone où la couverture végétale est faible peut induire une forte réflectance du sol,
- l'année d'étude ayant été une année de bonne pluviométrie, l'influence atmosphérique peut altérer la valeur des indices calculés. La présence de nuages sur l'image est sur ce point, éloquente,
- le nombre de sites échantillonnés devrait être plus élevé. En effet, certains sites échantillonnés se sont retrouvés hors-image à cause d'un retard dans l'acquisition des données.

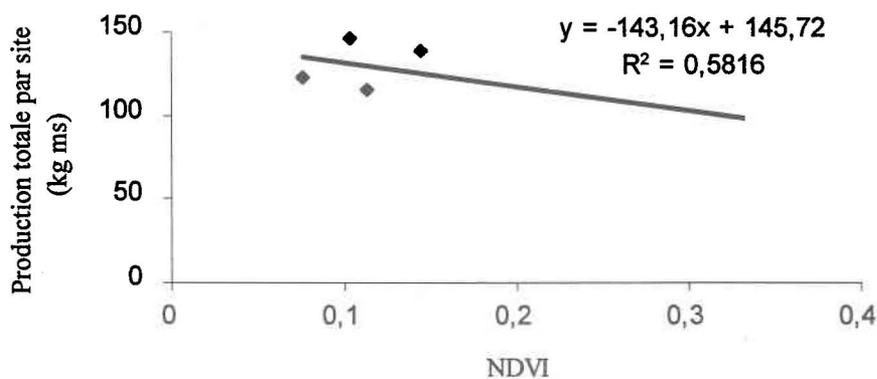
La régression entre le NDVI et la production herbacée est non-significative alors que cet indice est très bien corrélé avec la biomasse ligneuse. La prise en compte de la biomasse foliaire est un bon facteur correctif de la corrélation entre l'indice de végétation et la biomasse au sol (figure 19). Elle a permis une nette amélioration de la régression entre la production totale de matière sèche et l'indice de végétation. Toutefois le résultat doit être interprété avec soin, vu le nombre de points utilisés. Pour la régression entre le NDVI et les productions ligneuse et totale les sites qui s'écartaient de la droite et qui faussaient la régression ont été éliminés.

Le NDVI ayant fait preuve d'une meilleure corrélation par rapport aux autres indices, il a été retenu pour l'élaboration de la carte de biomasse végétale. Les résultats les plus faibles ont été obtenus avec le TSAVI. Ceci pourrait être dû à plusieurs causes: la difficulté de trouver une droite des sols dans le Ferlo; en effet, dans la partie cuirassée, il est presque impossible d'isoler la roche. Des pixels de végétation sont toujours apparents dans les sites d'entraînement. D'autre part, dans la partie sableuse du Ferlo, les pixels de sol nu peuvent se confondre avec la végétation morte ou encore avec certains types de graminées fines ne couvrant pas entièrement la surface du sol et qui peuvent avoir une réflectance élevée (Rasmussen, communication orale, 1995).

Régression entre la production herbacée et le NDVI



Régression entre le NDVI et la production totale



Régression entre le NDVI et la production ligneuse

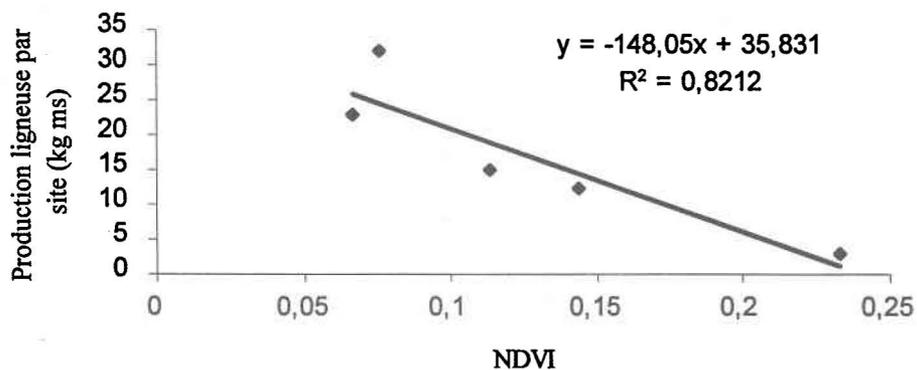


Figure 19 : Régression entre le NDVI et la biomasse au sol

3.3.4 Élaboration de la carte de biomasse végétale

La régression entre l'indice de végétation et la biomasse totale permet d'établir l'équation de la droite $y = ax + b$ qui permet de généraliser la production végétale. Avec une composition colorée, on détermine en kg de matières sèche à l'hectare la classe de production à laquelle appartient une zone de pâturage donnée.

L'équation de la droite de régression entre la production totale et le NDVI s'écrit:

$$y = -143,16x + 145,72 \text{ où } y \text{ représentant la biomasse et } x \text{ le NDVI, } r^2 = 0,58$$

La biomasse est calculée en kg à l'hectare et divisée en quatre classes (figure 20)

- moins de 500 kg / ha
- entre 500 et 1000 kg / ha
- entre 1000 et 1500 kg / ha
- plus de 1500 kg / ha.

Dans la zone d'étude l'essentiel de la production végétale est compris entre 500 et 1500 kg /ha.

3.3.5 Numérisation des cultures

A l'aide de IDRISI une composition colorée de l'image multispectrale SPOT du mois de septembre a été effectuée. Pour ce faire, on affiche la bande 3 (infra-rouge) dans le bleu, la bande 2 (rouge) dans le vert et finalement la bande 1 (vert) dans le rouge. Dans l'image composite, le parcellaire apparaît clairement; cette superposition de bandes permet d'identifier nettement la végétation en rouge et le sol nu de couleur très claire. Les cultures très visibles sont dessinées directement à l'écran. Le résultat est une carte des champs de format vectoriel.

3.3.6 Utilisation de photographies aériennes

L'exploitation des photographies aériennes a abouti à la photo-interprétation et à la numérisation des unités pédologiques et topographiques à l'aide du SIG ARC/INFO. Pour

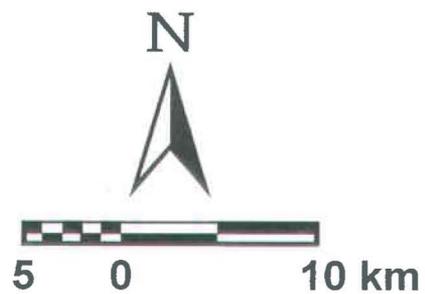
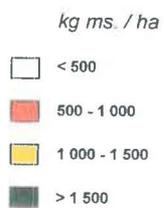
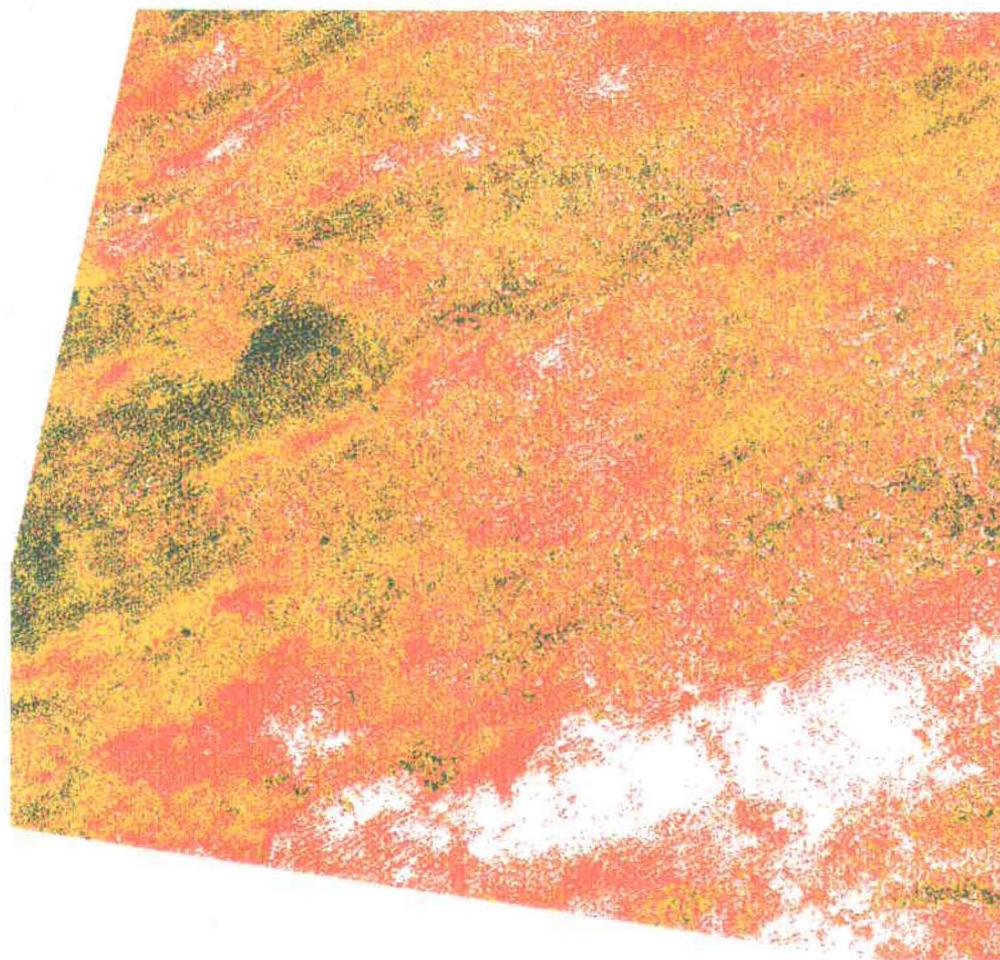


Figure 20 : Carte de biomasse

géoréférencer ces cartes, des points de contrôle ont été pris sur le terrain. La photo-interprétation a permis aussi l'identification des mares et des villages ce qui a facilité leur recensement sur le terrain. Les cartes produites sont stockées dans des fichiers de type vectoriel.

3.3.7 Recensement des points d'eau par GPS

Les mares, les forages et les villages ont été localisés par GPS (tableau 12 à 15). Leurs coordonnées géographiques ont permis de créer dans IDRISI des fichiers vectoriels constitués de points. Ce qui nous a permis de réaliser la carte des mares en nous basant sur les enquêtes pour établir la toponymie (figure 21).

En résumé, l'originalité de cette approche réside dans le fait de l'intégration de la technologie utilisée dans la gestion du système pastoral du Ferlo. L'acquisition d'information par la photo-interprétation et par la télédétection est très utile dans une étude de suivi de l'environnement. Elle complète à merveille les spéculations sur le terrain et son intérêt majeur se trouve dans la possibilité de restituer l'information recueillie sous forme visuelle. Toutefois, l'utilisation de la télédétection ne peut pas exclure les visites sur le terrain; l'information satellitaire doit être vérifiée afin d'éviter les erreurs d'interprétation qui peuvent survenir; l'échantillonnage de la végétation permet d'associer une valeur de production à la réflectance observée sur l'image. Si la télédétection est un outil de stockage de données, sa principale limite se trouve dans la gestion de ces données et c'est là qu'apparaît l'utilité des SIG qui, en plus de créer des bases de données, offrent la possibilité de les intégrer et de les gérer.

Mare	Latitude	Longitude	UTMx	UTMy
céterma	15°50'05	14°47'57	522180	1750490
w. lédème	15°54'60	14°41'43	532630	1759750
kéléli	15°53'37	14°44'57	526860	1757220
lumbi diwi	15°50'31	14°49'10	519350	1751460
lumbi diwi	15°50'26	14°48'59	519650	1751310
lumbi diwi	15°50'43	14°49.06	517460	1752120
w. gaïdoum	15°41'38	14°51'03	515978	1735090
w. lédème	15°54'10	14°42'27	531630	1759260
w. thielbi	15°43'08	14°45'03	526230	1740710
w. boulogne	15°39'08	14°43.02	530150	1730830
w. namadi	15°39'02	14°43'08	529240	1730350
w. yoli	15°56'02	14°51'06	515370	1762470
l.naybi (yoli)	15°55'09	14°51'40	515380	1760850
w. yoli	16°56'01	14°51'08	514630	1761640
loubol djite	15°51'07	14°39'16	536990	1752600
l. gaodi	15°51'13	14°39'11	537240	1752750
l. foundage	15°51'17	14°39'01	537380	1752920
loubi ngido	15°51'53	14°37'31	540100	1753020
l.mbatma	15°50'47	14°29'42	554050	1752010
l.mbatma	15°49'56	14°30'19	552970	1750440
wendoundoude	15°46'20	14°30'24	552850	1743800

Tableau 12 : mares autour du forage de Labgar

Mare	Latitude	Longitude	UTMx	UTMy
lumbol wuro	15°55'01	14°31'01	551200	1761180
w. rindo petite	15°57'00	14°31'08	550060	1764290
lumbol thill	15°56'00	14°35'08	545950	1761850
lumbol thill	15°56'01	14°35'04	544500	1762250
bourma	15°56'03	14°34'02	545860	1762810
bourma	15°56'04	14°34'06	545540	1762900
w. mbelkoum	16°00' 10	14°31'55	550060	1769200
loumbi nelli	15°57'12	14°31'47	550310	1763740
w. diahel	16°00'52	14°33'13	549920	1763390
wendu gassel	15°57'01	14°32'00	548610	1752620
w mbagoudobé	15°57'02	14°37'09	539990	1763550
w. baradji	15°01'00	14°36'08	541110	1772110
w. baradji	15°59'09	14°37'03	540210	1768140
wendu yaré	16°01'52	14°32'01	549870	1772350
wende mawnu	16°04'30	14°36'43	541480	1777170

Tableau 13 : mares autour du forage de Yaré Lao

Mare	Latitude	Longitude	UTMx	UTMy
l. Samba dada	16°01'21	14°44'63	527780	1771040
w. diam boubou	16°01'00	14°47'04	522110	1772450
w.diam boubou	16°01'00	14°47'03	522410	1771140
wendu thiwdé	16°02'03	14°40'08	535280	1773320
wendu thiwdé	16°02'01	14°40'01	533980	1773500
w. mamaniakhré	16°01'15	14°45'64	525920	1771680
w. mbélogne	16°04'02	14°48'00	520640	1777720
w. Abdou doulel	16°00'37	14°48'89	519610	1770330

Tableau 14 : mares autour du forage de Namarel

Mare	Latitude	Longitude	UTMx	UTMy
w namadi	16°04'34	14°53'54	510850	1777330
w.mawnu	16°04'57	14°52'52	512730	1778090
lumbol mangol	16°04'45	14°53'19	511890	1777700
windé doki	16°02'31	14°53'54	510900	1773570
lmbol kadione	16°08'35	14°49'41	518300	1784870
wendu gaodi	16°08'22	14°49'10	519320	1784370
belel bofel	16°08'19	14°49'11	519280	1784270
w. Kalidoudiore	16°06'22	14°49'22	518940	1780680
belel Abdel Had	16°08'38	14°49'30	518710	1784850

Tableau 15 : mares autour du forage de Mbiddi

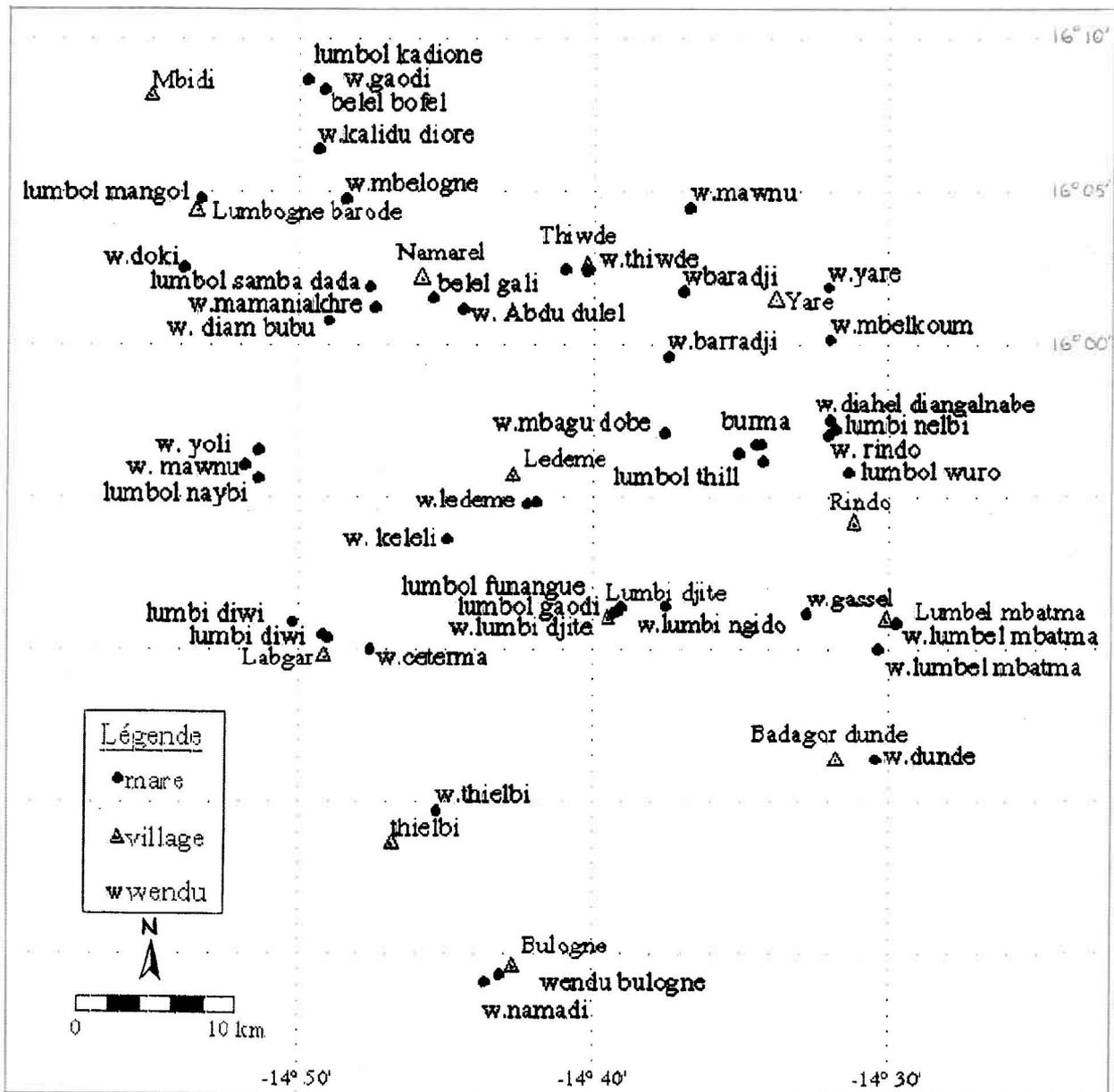
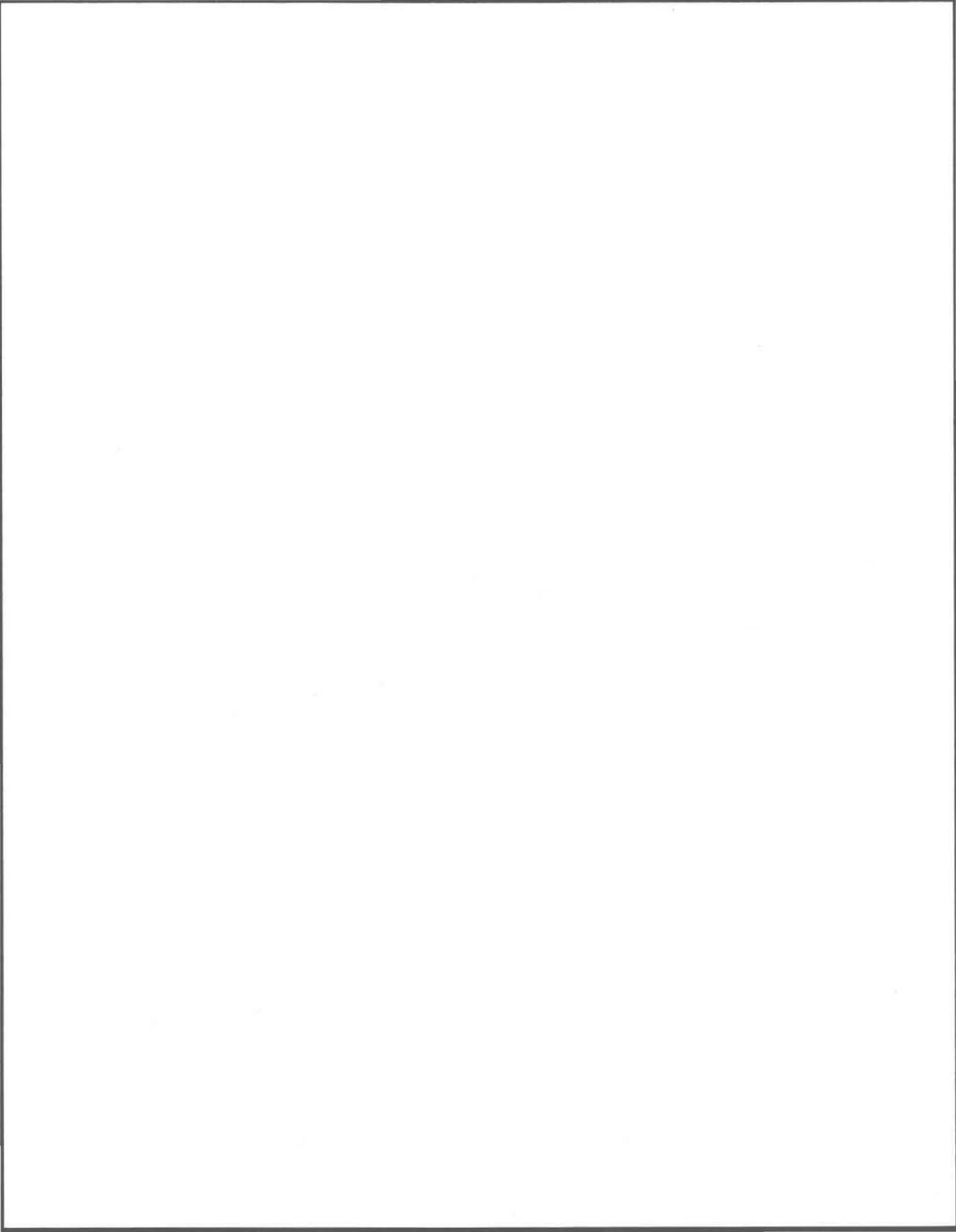


Figure 21 : Carte de localisation des mares



4 LE SIG : ANALYSE SPATIALE ET SYNTHÈSE CARTOGRAPHIQUE

4.1 Pourquoi utiliser un SIG ?

L'accroissement de la population des villes sahéniennes entraîne l'augmentation de la demande en produits issus de l'élevage. Il se pose alors la question de la commercialisation de la viande dans le but d'atteindre l'autosuffisance alimentaire. Devant l'installation de conditions climatiques déficitaires et la perte du droit coutumier, la gestion de l'élevage pose problème. Pour pallier à la méconnaissance des ressources, la mise à jour des anciennes cartes de pâturage s'impose. Et sur ce plan les SIG permettent de stocker l'information sur les ressources hydriques et végétales sous forme numérique. Faire un inventaire de ces ressources et les cartographier nécessitent la conjonction de plusieurs outils (SIG, télédétection et GPS). Le besoin de gérer et d'analyser ces données multisources justifie encore l'utilisation de tels systèmes.

A ce titre, l'utilisation d'un SIG permet de stocker, d'analyser et de gérer les données précédemment acquises afin de proposer des éléments pour une gestion améliorée des parcours.

4.2 Quelques exemples d'utilisation du SIG au Sahel

L'utilisation des SIG est à l'état embryonnaire dans le domaine sahéni. Les travaux de Yergeau *et al.* (1991) et de Traoré *et al.*, (1993), au Burkina Faso, donnent de bons exemples de la gestion des ressources hydriques au moyen d'images Landsat combinées à des données de sources diverses. Les premiers avaient pour but de procéder à un inventaire des points d'eau et de définir de nouveaux emplacements de forage par la recherche de linéaments sur l'image de satellite. L'objectif de ces travaux était de manipuler simultanément des données multivariées afin de prendre des décisions en fonction des priorités de développement. Ces études ont montré que le champ d'application potentiel de la télédétection s'accroît considérablement dès lors que les données aérospatiales s'intègrent à d'autres dans un SIG. Bénéié *et al.* (1993) ont réalisé un guide méthodologique d'utilisation de données satellitaires pour la cartographie des nappes de surface en plus de combiner les

résultats de cette cartographie avec des données bio-socio-géographiques, pour proposer des solutions aux problèmes associés à la gestion de l'eau (agriculture, consommation humaine et animale) à l'aide d'un SIG. Yergeau *et al.* (1994) ont aussi réalisé la gestion des ressources en eau au Sahel par l'intégration de données multisources. Le traitement simultané de données hétérogènes dans un système d'information à référence spatiale commence à être perçu comme une nécessité pour la gestion des crises environnementales sahéliennes. C'est le cas du projet ECOSSEN au Sénégal (Bénié *et al.*, 1993, Bénié et Lake, 1994) qui vise l'identification et l'analyse d'indicateurs de dégradation environnementale (aspects physiques, biogéographiques, socio-économiques) et la conception d'un SIG relatif à l'environnement sénégalais et à la dynamique des espaces ruraux.

4.3 Analyses spatio-temporelles

4.3.1 Création de la base de données

La fonction principale des SIG est celle de l'analyse spatiale. Ils permettent de saisir l'information sous forme numérique, d'attribuer un contenu thématique aux objets spatiaux, d'analyser cette information sur la base de son contenu thématique et d'effectuer des représentations cartographiques. La première opération dans un SIG est la création de la base de données.

IDRISI permet de stocker les données en mode objet (structure vectorielle) ou image (structure raster). Dans le premier mode, les limites et les bordures des objets sont décrites comme des séquences de points qui, joints par des lignes, forment la représentation graphique de cet objet. Les points sont eux-mêmes décrits par une paire de coordonnées X, Y, dans un système de référence tel que longitude/latitude ou UTM. Les caractéristiques thématiques des objets sont stockées dans un fichier (fichier des attributs) sous forme d'un identificateur qui est un nombre unique assigné à chaque objet de la carte. Dans le mode image, la description des objets et de leurs caractéristiques thématiques constituent des fichiers à structure unique. La zone est subdivisée en un maillage de cellules rectangulaires, chacune contenant une valeur numérique qui peut représenter soit un identificateur d'appartenance à un objet spatial, soit

une catégorie, classe ou valeur thématique. Les éléments qui constituent les cellules sont appelés pixels. Pour visualiser ces images, les valeurs des pixels sont remplacées par des symboles graphiques tels que des couleurs, des tons de gris ou des textures.

Pour cette étude, les données utilisées proviennent de sources multiples. Ce sont les cartes pédologiques et topographiques numérisées dans ARC INFO sur table traçante à partir des photographies aériennes; Ce logiciel travaillant en mode vectoriel est plus performant pour la cartographie. Les cartes produites ont été par la suite exportées sous un format image dans IDRISI dans le but de procéder à l'analyse spatiale qui ne se fait qu'en mode matriciel. C'est aussi le cas du fichier vectoriel des champs numérisé dans IDRISI et de ceux des points d'eau créés à partir de tables d'attributs représentant les coordonnées UTM fournies par le GPS. Enfin les images satellites traitées dans PCI sont également importées dans IDRISI pour être combinées aux données précédentes.

La première étape dans cette création de base de données est la géoréférence. C'est la définition du lien qui existe entre une couche ou une couverture et sa position à la surface de la terre définie par un système de coordonnées de référence. Toutes les données utilisées (cartes pédologiques, topographiques, image satellite, points d'eau, village, culture) sont géoréférencées dans le même système de coordonnées UTM. Pour toutes les images (vectorielles et matricielles) les coordonnées des quatre coins sont identiques et définissent la localisation de la zone d'étude. Cette géoréférence permet de garantir l'intégration et le passage d'une information d'un mode à l'autre, et d'éliminer les différences d'échelle.

Les données analysées sont toutes stockées dans IDRISI en mode image du fait que ce type de structure est plus performant pour des tâches d'analyse de distribution spatiale. D'ailleurs, c'est le seul mode qui permet de procéder à l'analyse de distance. Il permet aussi de faciliter l'intégration des données satellites qui sont également de type raster.

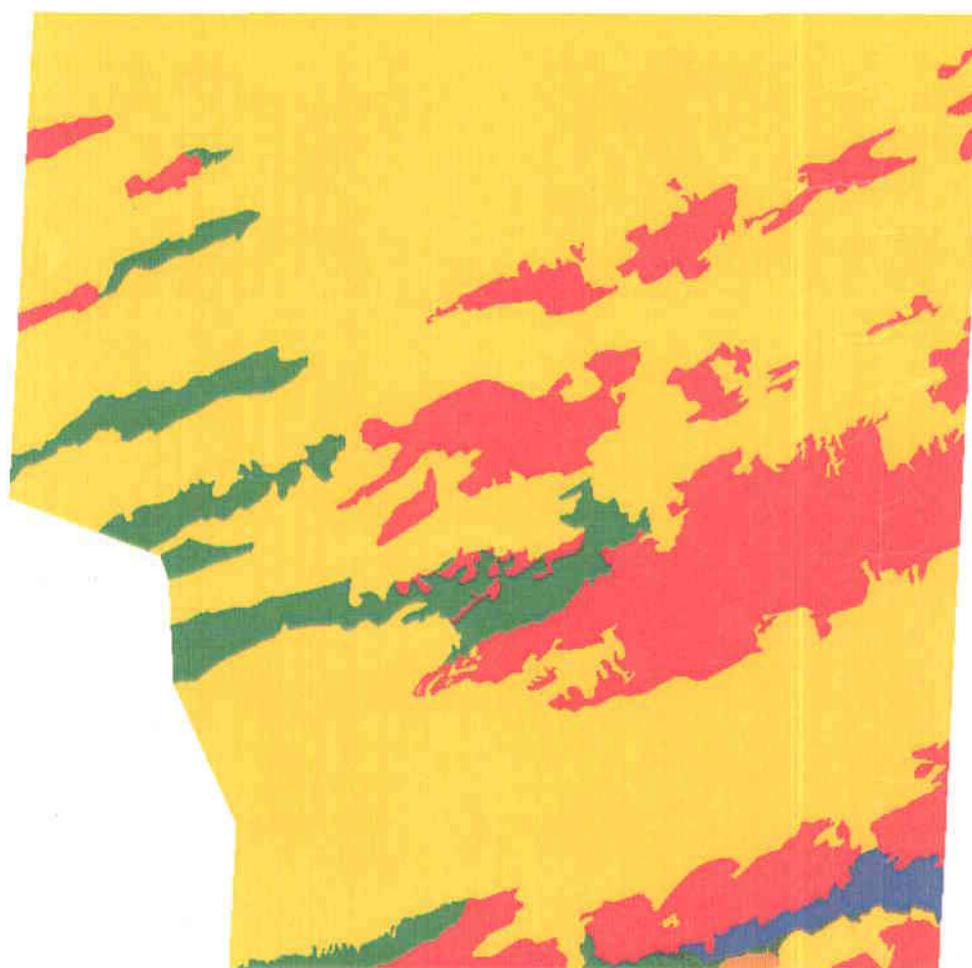
L'image satellitaire étant codée dans une structure matricielle, les différentes cartes numérisées sous format vectoriel doivent être converties, afin d'obtenir des données

superposables. Cette conversion vecteur-raster est une opération de routine dans IDRISI. Pour transformer les cartes de points d'eau en image, il a fallu initialiser dans le SIG des images vides de la même taille que l'image satellite dans le but ultime de pouvoir les superposer, en lui assignant les mêmes nombres de lignes et de colonnes. Ensuite, les fichiers vectoriels renfermant les coordonnées UTM des points d'eau sont combinés avec les images initialisées auparavant, l'identification des mares et forages se faisant par leur localisation. La carte pédologique fut également transformée en une image dont la taille du pixel correspond à celle de l'image satellite.

Les différentes données étant stockées dans le SIG sous forme d'images de même taille avec des coordonnées limitrophes en UTM identiques, la phase de l'analyse spatiale et d'intégration peut être amorcée.

Interprétation des données cartographiques

La carte pédologique (figure 22) montre que les sols squelettiques occupent la deuxième place du point de vue étendue après les sols sableux, ce qui limite déjà le potentiel fourrager de la zone d'étude. Toutefois, leur localisation dans les dépressions (figure 23) explique une plus grande concentration des mares dans ces cuirasses. Ceci pose le problème de la présence simultanée de l'eau et du fourrage. Il existe une inadéquation dans la répartition de l'eau et du fourrage. Là où le fourrage est de moindre quantité et qualité, l'eau abonde. Toutefois, les enquêtes menées auprès des populations ne font pas état de déficit fourrager durant la saison des pluies. Le potentiel fourrager disponible est suffisant pour nourrir le bétail en l'absence de sécheresse. Le problème est surtout sensible au cours de l'évolution annuelle de la biomasse, car à la fin de la saison des pluies, le potentiel constitué ne cesse de décroître jusqu'aux pluies de la saison suivante alors que les mares tarissent. Pour appréhender ce phénomène, l'analyse de changements (module de IDRISI) permet de comparer l'indice de végétation du mois de septembre à celui du mois d'avril.



-  Sols sableux à sablo-argileux (PS)
-  Sols cuirassés (G)
-  Sols argileux à argilo-sableux (A)
-  Dune continentale (D)
-  Sols hydromorphes (H)

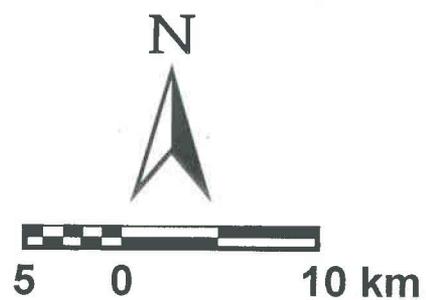
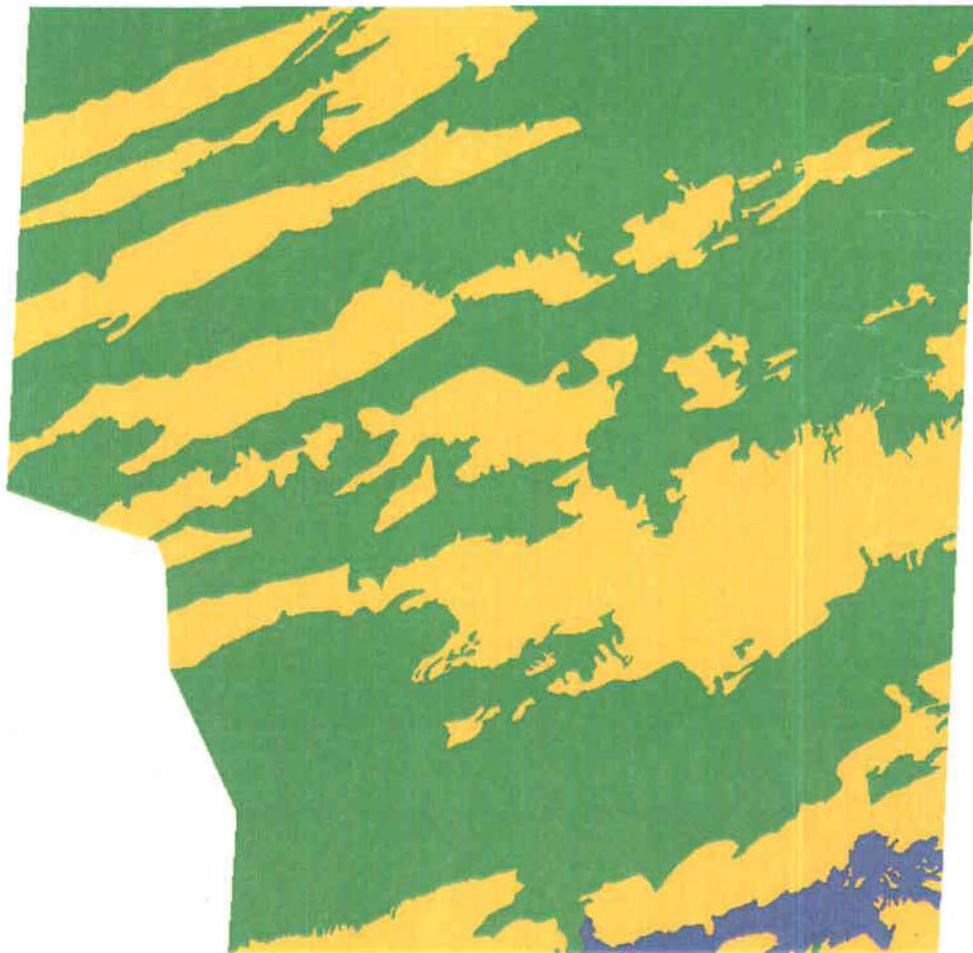


Figure 22 : Carte pédologique



- Dune
- Dépression
- Vallée

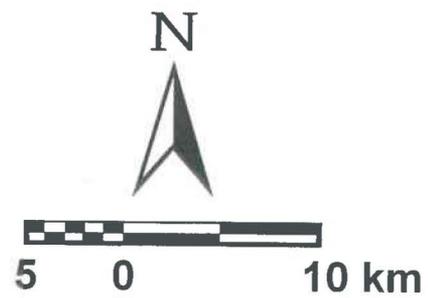


Figure 23 : Carte topographique

4.3.2 Analyse de changements

4.3.2.1 Évolution du NDVI entre septembre et avril

Elle a été estimée par la technique de rapport d'images à l'aide du logiciel IDRISI. Cette dernière permet d'apprécier les changements intervenus dans une zone donnée à deux dates différentes. Ainsi furent utilisés les indices de végétation de septembre et avril. Après reclassification de ces deux images pour éliminer les valeurs négatives et nulles (dans le but d'éviter la division par zéro), l'image de saison sèche est divisée par celle de la saison des pluies ; une transformation logarithmique ordinaire du résultat permet de distribuer les valeurs de manière à ce qu'elles soient normales et symétriques autour de zéro. Elles sont codifiées alors en trois classes :

- classe 1: $X_i < \mu - 3\sigma$
- classe 0 : $\mu - 3\sigma \leq X_i \leq \mu + 3\sigma$
- classe 2 : $X_i > \mu + 3\sigma$

Dans la présentation des résultats, les zones où la valeur des données est identique sur les deux images originelles recevront la valeur 1. Là où la valeur est supérieure au temps 2, elles recevront une valeur supérieure à 1 et là où la valeur est inférieure au temps 2, ce sera une valeur inférieure à 1.

La superposition de cette carte d'évolution du NDVI avec la carte pédologique nous montre les zones de végétation résiduelle en avril (figure 24). Elles sont toutes situées loin des forages en dehors d'une zone de deux à trois kilomètres, plus nombreuses sur sols argileux et hydromorphes et dans les dépressions. Ce qui pourrait s'expliquer par l'existence d'un tapis arboré plus dense dans ces secteurs. Les zones situées autour des forages de Labgar et Yaré Lao font état de dénudation prononcée. Ce sont les points d'eau de la saison sèche.

En plus de la comparaison de l'évolution du paysage végétal entre les deux saisons de l'année, le SIG permet de procéder à une intégration des données exploitées précédemment afin de

définir les sites favorables à l'élevage et de trouver des parcours permettant l'alimentation du bétail et la sauvegarde de l'écosystème.

4.3.2.2 Analyse spatiale

L'analyse cartographique se fait en deux étapes : l'interrogation de cette base de données et l'analyse de distance.

Interrogation de la base de données

La première opération est la *reclassification*. Elle consiste à créer une nouvelle couche d'information à partir des couches de base pour chacune des conditions de la requête. Exemple, si l'on veut sélectionner les zones où la biomasse est supérieure à 500 kg/ha, il suffit d'assigner "zéro" à toutes les zones de la carte de biomasse où elle est inférieure à 500kg/ha et "un", au reste. Cette nouvelle carte est appelée couche booléenne ou logique. Les différentes couches booléennes seront ensuite combinées en utilisant l'opération de superposition à l'aide des opérateurs logiques ou mathématiques. L'opérateur additif somme les valeurs de deux images pixel par pixel. La soustraction, la multiplication et la division opèrent de même. Cette combinaison d'informations à caractère spatial répondant à des critères définis est appelée identification des sites favorables.

Analyse de distance

La fonction *distance* calcule la distance euclidienne (horizontale) entre les cellules d'une image et un ensemble de cellules cibles définies dans un autre fichier. Le résultat sera connu sous le nom de "surface de distance". Cette fonction permet de construire des zones tampons (couloirs) autour d'objets spatiaux. Une variante de la fonction distance appelée *cost*, prend en compte la difficulté de se déplacer au travers d'une surface de friction et de barrières dans le calcul de la distance. La distance calculée est alors appelée distance pondérée. L'appellation a pour origine la mesure du coût de déplacement à travers l'espace qui peut être exprimée en terme de coût financier, en effort ou en temps. Les distances mesurées représentent le nombre minimum de pixels à traverser pour se déplacer d'un pixel au pixel cible le plus

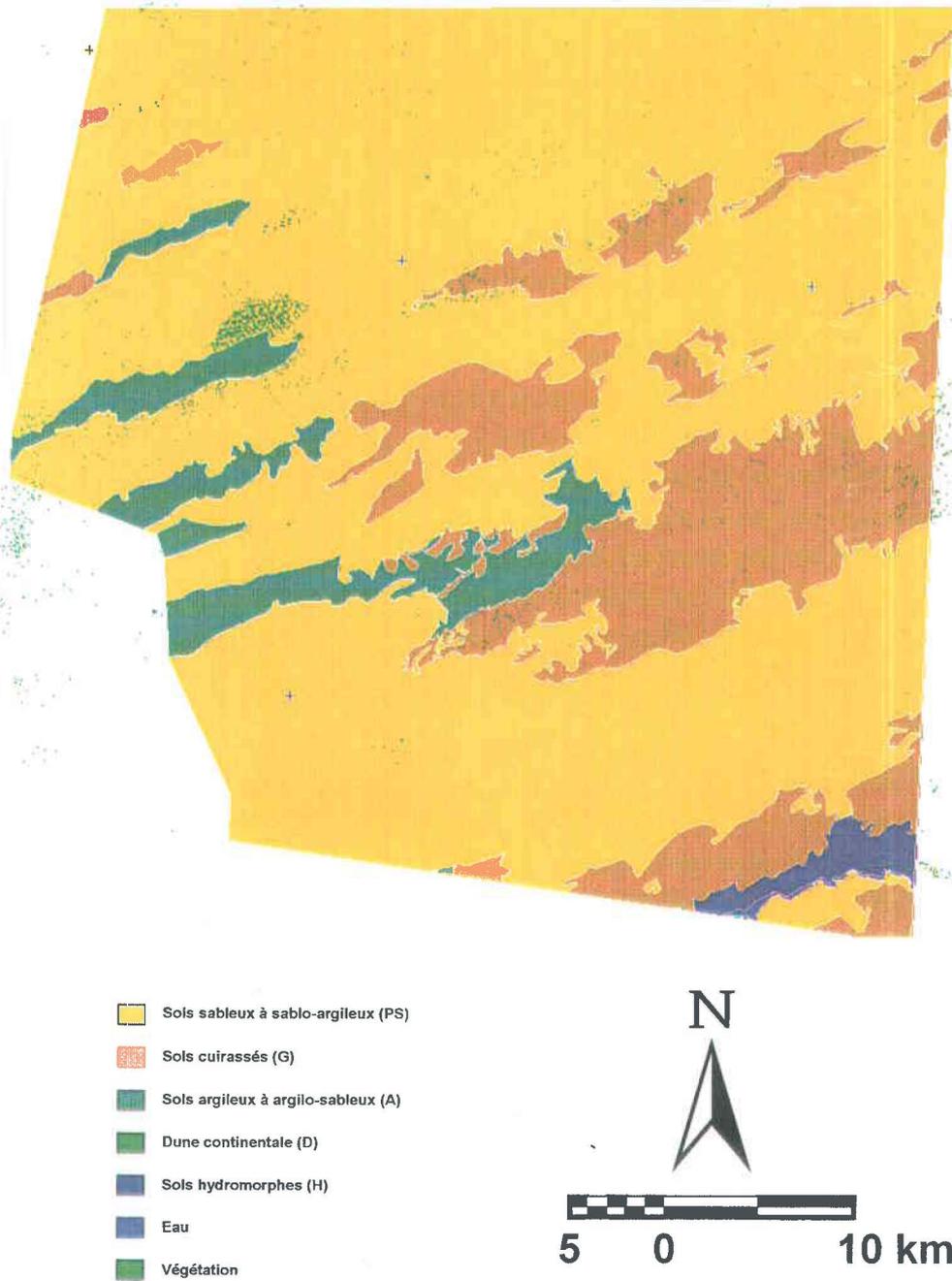


Figure 24 : Évolution du NDVI entre septembre et avril

proche. Les effets de friction augmentent ce temps de déplacement. Les coefficients de friction sont des nombres entiers dont la valeur est comprise entre 1 et 1.00E+37.

Une fois la surface de coût définie, on peut analyser le chemin de moindre coût entre deux lieux, résultant d'une autre opération de distance. C'est la couche de surface de moindre coût qui fournit l'information nécessaire à cette recherche.

4.3.2.2.1 Identification des sites favorables à l'élevage

L'étude socio-économique a montré que le déplacement du bétail en saison des pluies se fait du campement à la mare pendant qu'il exploite les pâturages environnants. Le même schéma se reproduit en saison sèche autour du forage. Les conditions idéales pour l'implantation des sites de pâturage sont donc:

- leur présence dans un rayon de 5 km autour d'une mare,
- la présence de fourrage,
- l'existence de pâturage abondant et de bonne qualité,
- la localisation dans une zone située à l'extérieur d'un rayon de 3 km des forages en saison des pluies et à l'intérieur d'un rayon de 15 à 20 km en saison sèche.

En effet, c'est dans un rayon de 2 à 3 km du forage que la pâture exerce une forte influence sur la végétation (Dakono, 1983; Sylla, 1984), d'où la nécessité d'exclure cette zone en saison pluvieuse pour permettre sa régénération. Par contre, 20 km correspond à la distance maximale pour le troupeau qui pâture autour du forage.

Les cartes de sol, de biomasse, de points d'eau et de culture ont été reclassifiées et combinées pour donner la carte des sites d'accueil des éleveurs et de leurs troupeaux. Le calcul de la distance autour des mares puis des forages et la reclassification des couches obtenues en retenant les distances de 5 km autour des mares et celles qui sont supérieures à 3 km aux alentours des forages donnent les aires d'attraction des points d'eau en saison des pluies (figure 25). Cette couche d'information est combinée à l'image des champs puis à la couche

booléenne du fourrage; celle-ci est obtenue par la reclassification de la carte de biomasse où les zones de sol nu et de couvert végétal faible sont assignées d'un "0". En superposant cette information synthétique avec la carte des types de sol et des pâturages associés, on identifie les sites propices à l'élevage (figure 26 et 27).

La gestion des parcours doit être basée sur l'optimisation de l'utilisation de l'eau et du fourrage en termes de qualité et de quantité. Le rapprochement de ces deux ressources doit tenir compte de la sauvegarde de l'écosystème; des critères favorables à la définition des sites ont été retenus. *A priori*, tous les types de pâturage sont exploités quelle que soit leur localisation. En fonction des saisons, les points d'abreuvement changent et les cultures représentent un frein au passage du bétail uniquement en saison des pluies. La carte des sites de saison des pluies regroupe les zones pâturées par le bétail, situées *à priori* dans l'aire d'influence des mares. Le but de cette synthèse de l'information est d'associer des poids à toutes ces composantes du système pastoral.

4.3.2.2 Détermination de trajets

Chaque élément représenté sur la carte des sites est pondéré suivant son impact environnemental (tableaux 16 et 17). Ainsi les mares et le fourrage qui sont les éléments recherchés par le bétail ont reçu une faible valeur de pondération, alors que les cultures et les zones de sol nu ou de biomasse faible qui représentent des barrières, de même que les localités situées à l'extérieur de la zone de polarisation des mares, sont hautement pondérées. Considérant qu'en saison des pluies le *baljol* possède un fourrage de meilleure qualité et qu'il est exploité en priorité du fait de la présence simultanée de l'eau, du fourrage et de celle des légumineuses, il lui est attribué la plus faible pondération par rapport aux autres types de sol; le *sanghré* moins fourni que le *baljol* et le *seno*, et dont le fourrage est d'une importance moindre, est plus hautement pondéré. Cette pondération a pour but d'estimer le coût de l'exploitation des ressources naturelles sur l'environnement; elle permet d'élaborer la carte de friction (Figures 28 et 29) en assignant les valeurs de pondération aux différentes classes

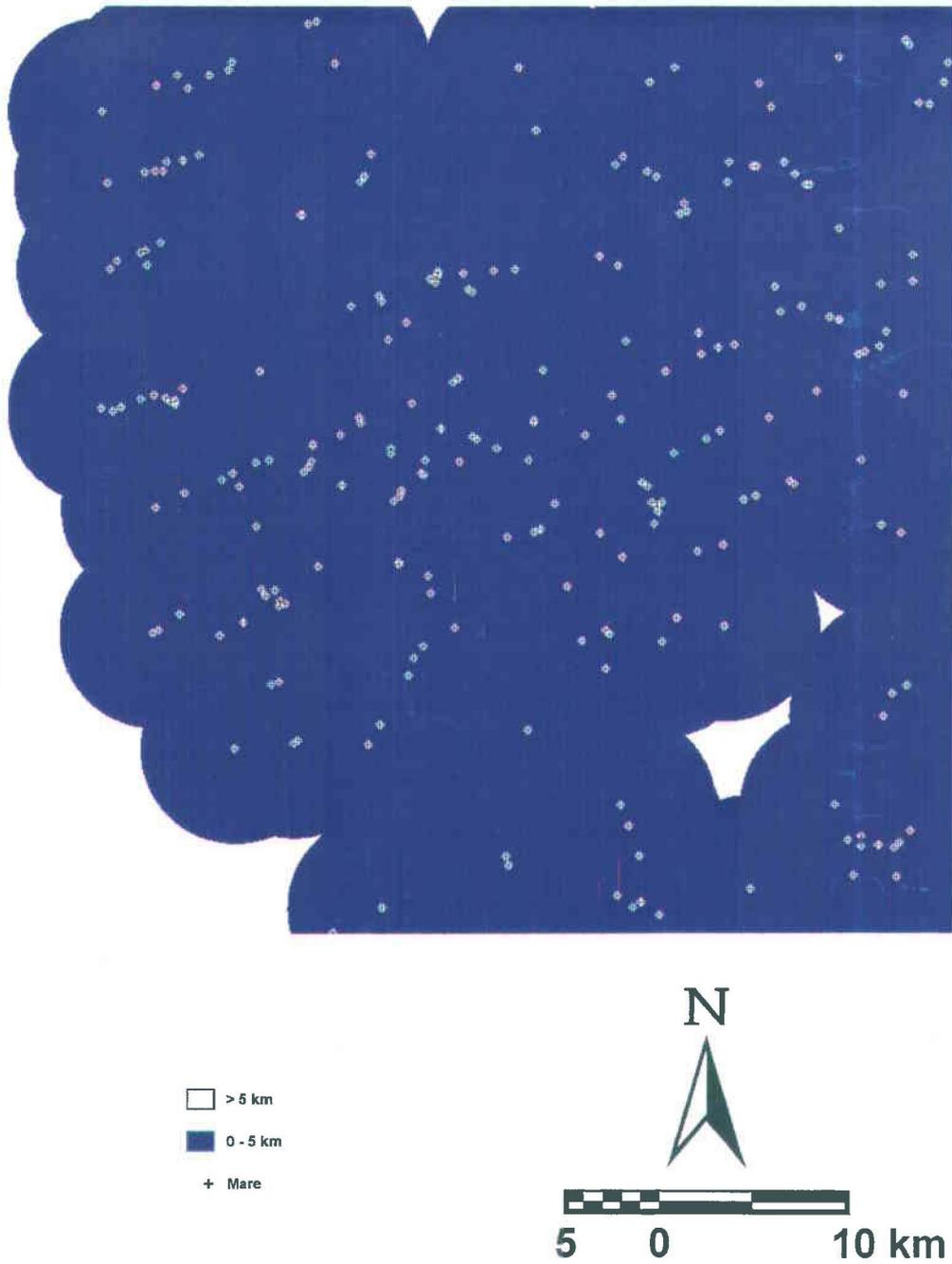


Figure 25 : Aire de polarisation des mares

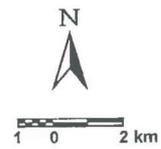
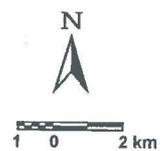


Figure 26 : Carte des sites de l'élevage en saison des pluies



- Sol nu
- PS - forage
- G - forage
- A - forage
- PS + forage
- G + forage + champ
- A + forage + champ



PS = sols sableux à sablo-argileux

G = sols cuirassés

A = sols argileux à argilo-sableux

Figure 27 : Carte des sites de l'élevage en saison sèche

classe	composante	valeur	explication
1	sol nu	1000	zone dégradée, pas de végétation
2	mare	1	référence
3	fourrage	1	référence
4	sol sableux (seno)	2	hauteur de l'herbe et présence d'épines gênent le troupeau
5	sol cuirassé (sanghré)	5	production végétale faible mais nombreuses mares
6	sol argileux (baljol)	1	meilleurs parcours: herbe de qualité et beaucoup de mares
7	champs	1000	à protéger contre la divagation du bétail
8	zones situées autour de 3 km du forage	800	mises en défens pour régénération
9	zones non desservies par une mare	900	difficilement accessibles

Tableau 16 : Valeurs de friction en saison des pluies

classe	composante	valeur	explication
1	sol nu	1000	pas d'intérêt pour le bétail
2	aire de desserte des forages	1	référence
3	zone situées en dehors de 15 km du forage	1000	inaccessibles, trop éloignées
4	sol sableux	2	végétation résiduelle, présence de ligneux
5	sol cuirassé	5	peu ou pas de végétation
6	sol argileux	1	végétation résiduelle, ligneux
7	champs	1	récoltés, ne sont plus des barrières

Tableau 17 : Valeurs de friction en saison sèche

de la carte des sites. Ensuite, la fonction *cost* génère une surface distance/proximité dans laquelle la distance est calculée selon le chemin de moindre coût pour se déplacer sur une surface de friction. *Cost* utilise un algorithme par balayage (*pushbroom*). Le résultat (figure 28) montre que les zones où la friction est élevée correspondent aux aires d'influence des forages dont l'exploitation, en saison des pluies, entraînerait le surpâturage et la dégradation; elle est également élevée dans les zones dégradées ou situées loin des points d'eau. Les sols squelettiques, du fait qu'ils ne sont pas très fournis en pâturage, ont une friction moyenne tandis que les valeurs de friction les plus faibles désignant les meilleurs parcours de saison des pluies sont localisées dans les zones sableuses et argileuses. Par contre, en saison sèche la friction est élevée dans les zones de sol nu et les zones dégradées où le troupeau ne peut s'alimenter ainsi que dans les zones situées à plus de 15 km des forages où il ne peut se rendre à cause de la distance et du manque d'eau. Ces zones avaient été hautement pondérées (voir tableau 17).

Enfin des trajets de moindre coût entre le point de départ (campement) et le point d'arrivée (mare ou forage) sont tracés à l'aide de la commande *pathway*. Cet algorithme consiste à suivre le chemin de plus forte pente à partir des cellules de départ jusqu'aux cellules d'arrivée qui présentent une valeur minimum dans la surface de poids (figures 28 et 29).

4.4 Analyse des résultats et proposition de politique de gestion des parcours

Cette étude a montré que l'espace pastoral sénégalais est confronté à une crise due à l'inégale répartition spatio-temporelle des ressources végétales et hydriques, conséquence de facteurs physiques et climatiques défavorables. Si l'échantillonnage de la végétation et le calcul de la production végétale à l'aide de données de terrain montrent qu'en année de bonne pluviométrie, le Sénégal dispose en moyenne de ressources végétales capables d'assurer la couverture des besoins avec des espèces adaptées aux conditions de sécheresse, des techniques de gestion inadaptées viennent assombrir le tableau. La transformation de l'espace pastoral et sa désorganisation se répercutent fortement sur la productivité de l'élevage et la

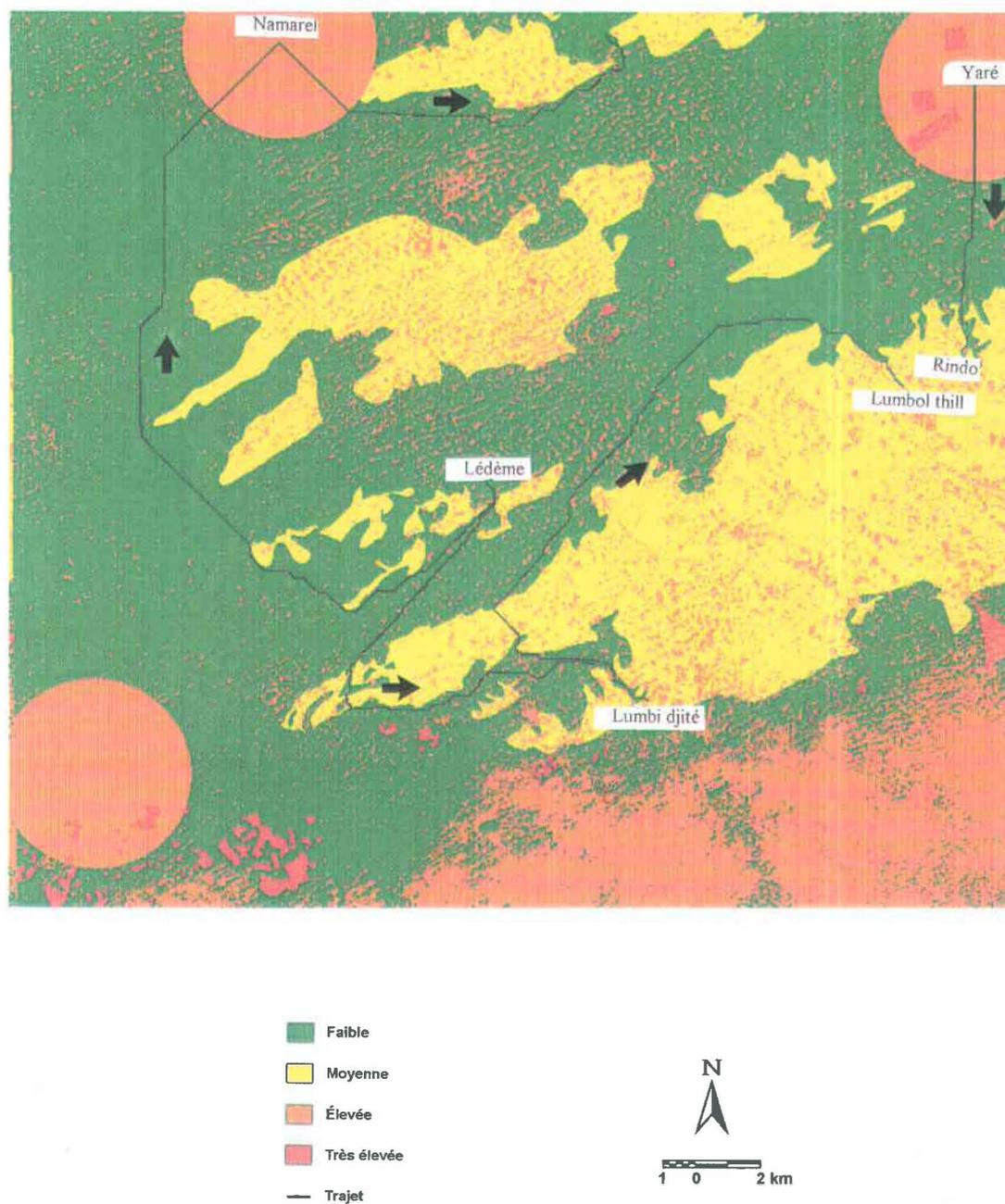


Figure 28 : Carte de friction de saison des pluies

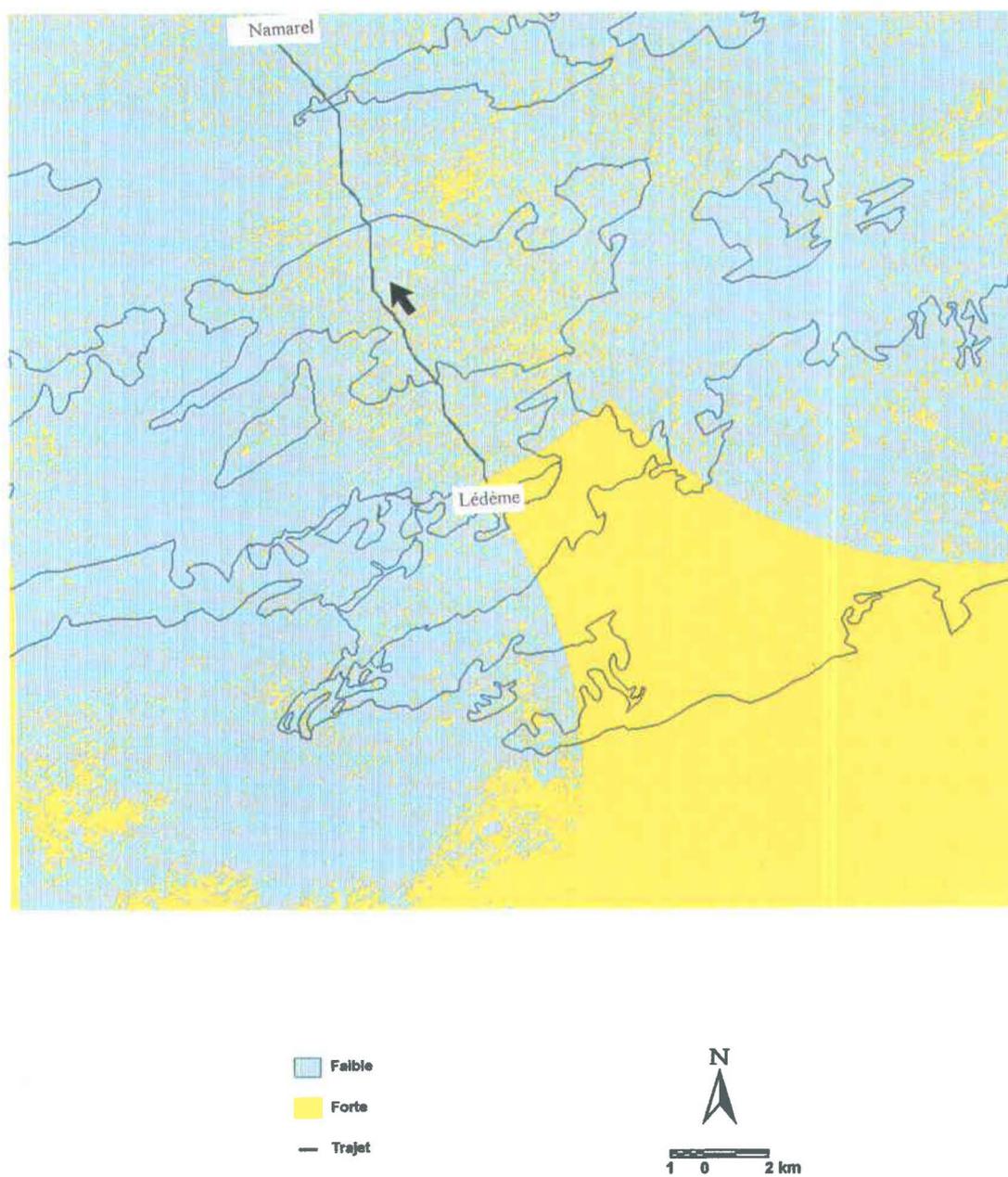


Figure 29 : Carte de friction de saison sèche

dégradation de l'écosystème. La méconnaissance des ressources freine l'intervention de l'Etat dans le secteur pastoral. Si les ressources hydriques abondent durant les saison des pluies, leur caractère éphémère en limite l'efficacité. De plus les analyses chimiques et bactériologiques ont montré la mauvaise qualité de l'eau.

L'interprétation de photographies aériennes et la cartographie du sol, du relief et des points d'eau (figures 22, 23 et 25) permettent de confirmer le déséquilibre spatial de la distribution des ressources. La carte pédologique montre l'étendue des sols squelettiques pauvres en végétation dont l'intérêt fourrager est minime. Ils occupent une partie importante de la zone d'étude. Par contre les terrains argileux qui représentent les meilleurs parcours pour le bétail sont les moins étendus. La topographie suit généralement le type de sol; les sommets sont représentés par les dunes sableuses alors que les parties argileuses et cuirassées se logent dans les dépressions. La carte de l'aire de polarisation des mares montre un bon quadrillage de l'espace par ces points d'eau notamment dans la partie centrale de la zone d'étude. On peut noter la présence de zones non desservies dans le sud-est. Cette cartographie a permis de mettre en évidence sur un support visuel la distribution des ressources.

L'intégration dans un SIG des données de télédétection avec celles provenant des travaux de terrain a permis, en se servant des enquêtes socio-économiques, de définir des sites favorables à l'élevage et des itinéraires pour les pasteurs et leurs troupeaux, qui, suivant le rythme d'exploitation des ressources végétales et hydriques, permettent une exploitation judicieuse et ordonnée des parcours. L'intérêt majeur de ces itinéraires réside dans le fait qu'ils prennent en compte la sauvegarde de l'environnement. Ainsi plusieurs exemples sont représentés sur la carte de friction de saison des pluies (figure 28). Les trajets entre le village de Yaré et les mares de Rindo, du campement de Lumbi djité à la mare de Loumbol thill, du village de Lédème vers les mares de Namarel sont tous situés le plus souvent dans des zones de friction faible tenant ainsi compte de la satisfaction de l'alimentation et de l'abreuvement du bétail (disponibilité de l'eau et du fourrage). Ce qui témoigne d'une utilisation optimale des ressources. Les zones dégradées ou faiblement végétalisées échappent ainsi à la pression

du bétail de même que les cultures. Le trajet Lédème-Namarel est défini pour les deux saisons de l'année afin de mettre en évidence les différences qui peuvent survenir. Il varie d'une saison à l'autre, est plus directe en saison sèche (figure 29) car l'absence des mares ne justifie plus le détour dans le *baljol* effectué en saison des pluies, en vue d'accéder en même temps à l'eau et au fourrage de qualité. Le but ultime étant le forage, le déplacement se fait de manière plus rapide. A ce stade, l'abandon de la pratique du gardiennage ne permet pas une exploitation judicieuse des parcours. Le bétail aura tendance à consommer le fourrage qui se trouve sur le chemin le plus court par rapport au point d'eau, et à laisser de côté des zones plus fournies en pâturage à proximité. À l'aide du SIG ces zones de végétation résiduelle peuvent être cartographiées en utilisant l'image satellite.

L'étude de la répartition des ressources hydriques par rapport au fourrage, condition *sine qua non* d'une gestion adéquate des parcours naturels du Ferlo, peut donc être réalisée à l'aide de la télédétection et d'un SIG. La combinaison de ces derniers aux données de terrain, représente un outil essentiel dans l'inventaire et la surveillance des ressources. Les images satellites fournissent l'indice de végétation mais ne permettent pas de quantifier la production. Les mesures de terrain sont donc essentielles pour compléter l'information. Le satellite SPOT représente un outil de cartographie et de suivi de la biomasse dans la zone sylvo-pastorale sénégalaise. Toutefois, cette cartographie est confrontée à des difficultés qui se traduisent par un coefficient de corrélation relativement faible entre le NDVI et la biomasse végétale en milieu sahélien. Cela suppose l'amélioration des indices de végétation utilisés en fonction des spécificités du milieu notamment la forte réflectance du sol et la présence de cuirasse. Cependant ces difficultés d'ordre technologique n'enlèvent rien à la valeur de la méthodologie proposée. Malheureusement la télédétection ne permet pas de repérer les mares, la plupart étant de petites dimensions. L'utilisation des photographies aériennes et du GPS vient pallier à ce manque et la cartographie assistée par ordinateur permet de stocker l'information dans un SIG. L'étude de la gestion des parcours par une approche combinée des méthodes conventionnelles, de la télédétection et des SIG sert à mieux appréhender la crise pastorale au Sahel. Il permet la prise en compte de tous les facteurs intervenant dans la disponibilité et

la gestion des ressources en plus d'apporter des moyens d'inventaire, de cartographie et de suivi de ces ressources. En disposant de tels moyens, on peut aboutir à la contribution à l'aide à la décision des pouvoirs locaux et des bailleurs de fonds par l'entremise de l'analyse des informations spatiales, qui aboutit à des propositions concrètes de définition de trajets. Ceux-ci sont favorables à l'optimisation des besoins du cheptel et à la protection de l'écosystème pastoral contre le surpâturage et la dégradation.

Toutefois, cette utilisation combinée de la télédétection et des SIG n'est pas sans limite. Le fait qu'il s'agisse de nouvelles technologies pose le problème de quelques lacunes à combler dans leur développement futur. Le principal problème rencontré est la gestion de fichiers d'images de taille importante qui exige un temps considérable pour le traitement des données notamment dans le cadre de l'analyse spatiale. L'apparition des *pentium* permet sûrement de pallier à cet état de fait. La cartographie des trajets s'est confrontée à une limite; la superposition de ces itinéraires qui sont contenus dans des fichiers vectoriels sur l'image de friction, ne permet pas de montrer les points de départ et d'arrivée. La direction est indiquée manuellement à l'aide de flèches. Les résultats obtenus doivent également être validés sur le terrain et abordés à des échelles plus fines. Pour cette étude les images créées ont reçu la résolution spatiale de SPOT dans le but d'homogénéiser la manipulation des données.

Cette étude intégrée permet de localiser les zones déficitaires en eau ou en fourrage et de procéder à leur aménagement. La définition de barrières dans les zones dégradées permet leur régénération. Ainsi, les zones situées dans un rayon de trois km du forage sont protégées du surpâturage engendré par l'exploitation de ce point d'eau en saison sèche.

Le problème de l'eau au Sahel a donc d'énormes conséquences sur le milieu naturel, notamment en ce qui concerne la qualité et la quantité de l'eau et du fourrage, les deux éléments fondamentaux du pastoralisme. La dépréciation des ressources se répercute sur la productivité de l'élevage jugée médiocre et sur la dégradation de l'écosystème, suite à des pratiques pastorales inadéquates dictées par la recherche de l'eau et la difficulté d'assurer conjointement l'alimentation du bétail. La modification des pratiques d'antan qui s'est traduite

par l'absence de législation et de règles régissant la gestion des parcours et des points d'eau, de même que l'abandon du système de gardiennage des troupeaux, a entraîné une exploitation anarchique des ressources qui s'effectue sans le moindre souci de préservation de l'environnement. Aussi, l'amélioration de la gestion des parcours doit se faire à travers une série de mesures techniques dont l'amélioration des conditions d'abreuvement, l'amélioration des pâturages et l'amélioration relative au troupeau mais aussi par la participation des populations locales aux décisions.

a) L'amélioration des conditions d'abreuvement

Afin d'atteindre l'autosuffisance en eau et de rapprocher de l'eau les pâturages de saison sèche, il faudrait procéder à l'aménagement des mares temporaires pour en accroître la durée, ceci, dans le but d'atténuer la pression exercée au niveau du forage et d'accroître l'exploitation des pâturages de saison des pluies. Le surcreusement des mares les plus attrayantes (Mbélogne, Mbelkoum, Lédème, Thielbi et Rindo), de même que leur assainissement pourraient améliorer la gestion de l'eau dans la zone d'étude en permettant l'utilisation optimale d'une eau gratuite et jugée plus intéressante par les populations locales. L'assainissement aurait pour but de mettre à leur disposition une eau de meilleure qualité en contrôlant les maladies d'origine hydrique. Le forage de puits dont deux seulement ont été recensés, pourrait également contribuer à une utilisation plus judicieuse des parcours. L'aménagement de ces mares devrait être accompagné de reboisement sur leur pourtour, afin d'éviter les phénomènes de comblement et de ravinement. Des couloirs d'accès pour le bétail devraient être prévus. Leur durée fonctionnelle pourrait s'accroître par l'épandage d'argile au fond ou par empierrement. Cet aménagement aurait pour but de maintenir les éleveurs plus longtemps dans leurs campements de saison des pluies; les distances parcourues par le troupeau pour l'abreuvement et l'alimentation seraient ainsi réduites. L'amélioration des conditions d'abreuvement devrait aussi être envisagée en terme de qualité. Le troupeau ne doit plus avoir un accès direct à la mare pour éviter que les déjections ne contaminent et ne polluent l'eau. Ces points d'eau devraient donc être clôturés par des haies de branchage d'épineux. L'abreuvement pourrait se faire plus proprement par creusement d'un puits qui serait

mis en contact avec le fond de la mare par un système de tubage (Serres, 1980).

Au niveau des forages, des antennes pourraient être créées (structures reliées au forage par un système de canalisation dans un rayon de 5 km) afin d'éviter le surpâturage en diminuant la charge animale. Des bornes fontaines serviraient à abreuver les populations.

b) L'amélioration des pâturages

Il faudra ici distinguer les pâturages de saison des pluies, des pâturages de saison sèche. Grâce à la télédétection, les zones très productives situées dans l'aire de polarisation des forages, pourraient être repérées et faire l'objet de mise en défens au cours de la saison humide. Elles constitueraient des réserves pour la longue saison sèche. Les zones dégradées seraient aussi mises en défens dans le but de leur régénération. Ainsi, pour éviter le surpâturage engendré par la concentration massive du bétail autour du forage en saison sèche et les longs déplacements du troupeau, les pâturages les plus éloignés de ce point d'eau seraient exploités en priorité. Et au fur et à mesure de cette saison, le troupeau se rapprocherait des pâturages attenants à ce point d'eau. L'exploitation des pâturages éloignés pourrait être facilitée par la contribution des pasteurs. Leur rôle sera alors de puiser de l'eau qui, transportée sur des charrettes, pourrait servir à l'abreuvement du troupeau sur place, évitant même l'attroupement au forage et les grosses fatigues d'un troupeau déjà affaibli par l'appauvrissement de l'herbe. Il faudrait définir et localiser à l'aide d'un SIG les couloirs de passage du bétail. Une production fourragère de meilleure qualité pourrait être atteinte par l'introduction de graminées pérennes et de ligneux dans les vallées dunaires et les bas-fonds, de même que par la récolte de foin de légumineuses avant la floraison, et d'arbustes à feuilles caduques larges comme *Grewia* et *Pterocarpus*.

c) L'amélioration relative au troupeau

Il faudrait identifier les animaux de chaque localité afin de contrôler les charges et développer chez les éleveurs la notion d'intérêt commun, nécessaire à la sauvegarde de l'environnement. La pratique du gardiennage et de la conduite des troupeaux devrait être re-vulgarisée et

encouragée. Elle aurait pour but de suivre de près l'alimentation du bétail en repérant les pâturages les plus riches dont la consommation se traduirait par la prise d'embonpoint du bétail. La capacité sélective de l'animal est un bon indicateur pour l'éleveur pour déterminer la qualité du pâturage. Le gardiennage permet d'éviter la consommation mortelle d'un tapis herbacé flétri par l'arrêt précoce de la précipitation et d'éviter certaines maladies comme la météorisation causée par *Zornia* qui se traduit par l'enflement du ventre du bétail, lorsqu'elle est consommée avant la floraison. La surveillance du troupeau permet également d'éviter son envasement dans le *baljol* lors de précipitations abondantes.

d) La participation des populations locales

Toutes les mesures préconisées précédemment devraient être accompagnées de législation pour réglementer l'occupation des points d'eau et les transhumances. Cela requiert une organisation des populations locales qui devraient se doter d'un système de contrôle de leur territoire. Ils pourraient également lutter contre les feux de brousse qui causent une énorme perte de fourrage chaque année. Ces populations devraient être informées de l'existence des moyens modernes de gestion de leur environnement et consultées sur le degré de leur applicabilité vis à vis de l'expérience qu'ils ont du milieu pastoral. Il serait fondamental de les conscientiser sur le fait qu'une bonne gestion du milieu par le biais de techniques adéquates permettrait d'accroître la productivité de l'élevage. Elles devraient être sensibilisées également en ce qui concerne le problème d'hygiène causée par l'utilisation d'une eau polluée et les conséquences sanitaires qui en découlent. L'application d'une telle étude dans le domaine pastoral ne pourrait être une réussite que si les populations locales y participent activement, acceptent de coopérer étroitement avec les agents de l'Etat et les chercheurs. Il serait souhaitable d'organiser des séances d'information et d'éducation pour sensibiliser les pasteurs aux problèmes environnementaux et essayer de dresser conjointement avec eux des programmes d'intervention dans le monde pastoral en leur accordant la confiance et la responsabilité requises.

5 CONCLUSION

La situation géographique, la géomorphologie et les conditions climatiques ne sont nullement favorables à l'écosystème pastoral sénégalais. L'existence d'une longue saison sèche au cours de laquelle l'activité végétative est freinée par le manque d'eau pose le problème de gestion du potentiel disponible. Malgré une bonne production végétale et l'existence d'espèces adaptées aux conditions de sécheresse du milieu, la mauvaise répartition spatio-temporelle de l'eau et du fourrage pose le problème de leur rapprochement. Cette situation est aggravée par la modification des pratiques pastorales qui ne tiennent plus compte de l'environnement; l'abandon du gardiennage et la sédentarisation autour des forages entraînent une baisse de productivité de l'élevage. Celle-ci est aggravée par l'absence de mesures d'hygiène; l'exploitation d'une eau polluée est la cause de maladies gastro-entériques fréquentes dans le milieu pastoral.

L'approche d'une telle problématique par la méthode conventionnelle combinée à la télédétection et aux SIG a montré la nécessité de disposer de moyens d'inventaires et de cartographie des ressources végétales et hydriques par le biais de la télédétection et des SIG. Malgré leur apport, les nouvelles technologies ne sont pas encore assez au point pour régler les problèmes qui se posent. Toutefois, elles apportent une contribution remarquable dans le suivi de l'environnement sahélien, dans un domaine où sans le contrôle de la gestion, le patrimoine déjà mal connu risque d'être dilapidé en entraînant des conséquences irréversibles. Même si ce travail a pu mettre en lumière des éléments de gestion des parcours naturels sénégalais, il ne représente qu'un pas dans la recherche d'une exploitation rationnelle basée sur la connaissance des ressources et des modalités de leurs utilisations. Il pourrait être amélioré par des analyses diachroniques du secteur à l'aide d'images satellitaires multitudes. Ces dernières seraient intéressantes pour le suivi de l'évolution du fourrage tout au long de la saison des pluies de même que pour la mise en évidence des phénomènes de désertisation, par la comparaison d'images pluriannuelles. Le but poursuivi serait de pouvoir déceler des indices de sécheresse et de désertisation et de mettre en place des stratégies d'intervention en cas de calamités. La définition de ces stratégies se ferait avec la collaboration des populations locales dont la connaissance du milieu pastoral acquise à travers l'héritage et la sagesse de

plusieurs générations, ne pourrait être remplacée par aucune spéculation scientifique. Après l'aménagement des mares, il serait utile de procéder à des études hydrodynamiques pour connaître leur fonctionnalité, les volumes d'eau existants et le taux d'évaporation. Les lacunes dans le dénombrement du cheptel devront également être comblées en vue de contrôler la distribution des charges.

6 LISTE DES RÉFÉRENCES

ABDELMADDJIT, S. 1981. "Questions de santé animale dans les projets de développement de l'élevage. Étude du cas de la SODESP". Mémoire CPU EISMV, Dakar, 41 p.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, édition, 1981. Standards methods for the examination of water and wastewater, 5^{ème} édition 1980, APHA, AWWA, WPCF

ANDERSON D.A., et R.J. SOBIESKI. 1980. Introduction to microbiology 2nd édition. The CV Mosby Company Saint-Louis, Toronto, London, 518 p.

ANONYME, 1992. Volet hydraulique du programme ADENA/OXFAM Communauté rurale de Gamadji Saré. Arrondissement de Gamadji Saré. Département de Podor. Région de Saint - Louis. Étude de faisabilité technique et financière. Rapport définitif Bureau VERITAS Dakar, Sénégal, 61 p.

ARCHAMBAULT, J. 1960. Les eaux souterraines du Sénégal. Dakar, BRGM.

BA, C. 1986. Les peul du Sénégal . Étude géographique. NEA, Dakar - Abidjan - Lomé, 394 p.

BA, OM. 1983. "Essais d'évaluation des phénomènes de dégradation dans la zone sylvo-pastorale du nord Sénégal (Ferlo). Étude de cas autour des forages de Labgar et de Révane". Rapport de stage FAPIS, 20 p.

BANCROFT, K., R.J. NELSON et G. CHILDERS. 1989. "Comparison of the Presence-Absence and Membrane filter techniques for coliform detection in small nonchlorinated water distribution systems". In Applied and environmental microbiology, vol. 55 no. 2 (février), p. 507-510.

BARIOU R., D. LECAMUS et F. HENAFF. 1985. Indices de végétation. Dossiers de télédétection. Centre Régional de télédétection, Université de Rennes 2, 121 p.

BARRAL, H. 1982. Le Ferlo des forages: gestion ancienne et actuelle de l'espace pastorale. Système de production d'élevage au Sénégal. ORSTOM-Dakar, 85 p.

BARRAL, H. 1983. Les systèmes de production d'élevage dans la région du Ferlo. ACC/GRIZA/LAT. Dakar, 172 p.

BARET F., et G. GUYOT. 1991. "Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment". Remote Sensing of Environment, vol. 35, p. 161-173.

- BÉNIÉ, GB., L.A. LAKE., S. KABORÉ et M.J. TOUSIGNANT. 1993. Cartographie opérationnelle des ressources en eau de surface en milieu sahélien : application au Burkina Faso. Guide méthodologique, CARTEL, Ministère de l'eau, Direction de l'hydraulique et des ressources hydrauliques et des ressources hydrauliques (Burkina Faso), ACCT, 18p.
- BÉNIÉ., G.B., et L.A. LAKE. 1994. "Ecographie du SÉNÉGAL subsaharien. Environnement (ECOSSEN) et développement durable", colloque tuniso-canadien sur les SIG utilisant les données de télédétection, Hammamet, Tunisie, 9 p.
- BERGSTEIN, T., B. Dan et F.KOPPEL . 1992. "Indicator bacteria for fecal pollution in the littoral zone of lake Kinneret", Water Resources, vol. 26 no. 11, p. 1457-1469.
- BILLE, JC. 1972. Etude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. ORSTOM, 82 p.
- BONDE G.J. 1977. "Bacterial indicator of water pollution", Advances in aquatic microbiology. vol. 1, p. 273-356
- BORDNER R. et J. WINTER. 1978. Microbiological methods for monitoring the environment. Water and wastes. Environmental monitoring and support laboratory. Cincinnati.
- BOUÉDO M., M. BERTU., F. GUIZIOU et M.BERTRAND. 1991. Étude du risque de contamination fécale des eaux après épandage de lisier. Informations techniques du CIMAGREF, , no 84 (Décembre) note 1, 7.
- BOUDET G. 1985. Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. Institut d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux. Ministère des relations extérieures coopération et développement, République française, Paris.
- BURGE, W.D., D. COLACICCO et W.N CRAMER. 1981. "Criteria for achieving pathogen destruction during composting". Journ Water Poll Contr Fed, vol.53, p 1680-1683.
- BURN, D.H et E.A. Mc BEAN. 1987. "Non linear optimization modeling of coliform bacteria". Water air and soil pollution, vol. 32, pp 183-200.
- BREMAN H. et N. RIDDER, 1991. Manuel sur les pâturages des pays sahéliens. ACCT - CTA - Karthala, 481 p.

- CANALE, R.P., R.L. PATTERSON., J.J. GANNON et W.F POWERS. 1973. "Water quality models for total coliform". Journal WPCF vol. 45 no. , p. 325-336.
- CENTRE DE SUIVI ÉCOLOGIQUE. 1991. Étude de la distribution spatiale et des mouvements de bétail par enquêtes aériennes, 1989 - 1990. Document NT91-02, CSE, Publications, 24 p.
- CENTRE DE SUIVI ÉCOLOGIQUE. 1992. Estimation des effectifs du bétail par Vol Systématique de Reconnaissance dans la moitié nord du Sénégal. Rapport de campagne. Dakar, Sénégal, 9 p.
- CHONG, D.L.S., E. MOUGIN., J.P GASTELLU-ETCHEGORRY. 1993. "Relating the global vegetation index to net primary productivity and actual evapotranspiration over africa", International journal of remote sensing, vol. 14 no. 8, p. 1517-1546.
- CISSÉ, A.M. 1986. Dynamique de la strate herbacée des pâturages de la zone sud-sahéliennes, Wageningen, 211 p.
- CLUB DU Sahel 1986. Analyse des conditions de l'élevage et propositions de politique et de programmes. Rep du Niger.
- CORNET, A., H. POUPON. 1977. Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long d'un gradient climatique en zone sahéenne au Sénégal. ORSTOM, Dakar.
- COUILLARD, D. 1981. "Systems analysis for description of environmental pollution", Water supply and management, vol. 5 no. 2, p. 183-194.
- COUILLARD D., et Y. LEFEBVRE . 1985. "Analyses of water quality indices", Journal of environmental management, vol. 21 no. 2, p. 161-179.
- COULIBALY, S. 1983. "Évolution des pâturages naturels. Approche générale. Étude du cas de l'UP de Sil (zone PDES0)". Rapport de stage, Dakar FAPIS.
- DAKONO, J. 1983. "Effets de la charge animale sur la composition de la végétation : aspects quantitatifs et qualitatifs: quelques observations autour des forages de Labgar et Namarel". Mémoire CPU Dakar Sénégal, 31 p.
- DÉGOTO, S. 1984. La dégradation du couvert végétal au Sahel. Étude des zones pastorales du Sénégal. Rapport de stage FAPIS, 17 p.
- DIA, P.I. 1981. "Mémoire sur l'hydraulique pastorale dans la zone sahéenne du Sénégal". Mémoire CPU, Dakar, Sénégal, 27 p.

- DIA, P I., 1981. L'hydraulique pastorale dans la zone sahélienne du Sénégal. EISMV - CPU, 29 p.
- DIA, P.I. 1985. Séminaire régional sur la problématique et les stratégies sylvo-pastorales du Sahel, Dakar, Sénégal, FAPIS/UNESCO/CILLS/EISMV.
- DIALLO, H. 1983. Quelle approche sociologique pour le développement de l'élevage sahélien? Rapport de stage, CPU, 27 p.
- DIALLO, O., A. DIOUF., N.P. HANAN., A. NDIAYE et Y. PRÉVOST. 1991. "AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa : 1987-1988". International journal of remote sensing, vol. 12 no. 6, p. 1259-1279.
- DIAWARA, I. 1984. "Evolution de l'élevage bovin dans la zone sylvo pastorale du Sénégal (1911-1980)". Thèse Médecine Vétérinaire, Dakar, 126 p.
- DIÈNE, M. 1987. "Dynamique pastorale et tendances socio-économiques dans la région de Podor. Exemple de l'élevage bovin". TER maîtrise de géographie Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 89 p.
- DIÈYE. KH. 1983. Étude du tapis végétal d'un écosystème sahélien. Estimation des potentialités et analyse des processus de dégradation. Systèmes de production d'élevage au Sénégal. DEA Univ. Paris Sud-Orsay ISRA - LNERV, 63 p.
- DIOP, AT. 1984. Inventaire et suivi des ressources en eau du Ferlo nord (zone pilote du Projet Ecosystèmes Pastoraux Sénégalais) ISRA - LNERV, 34 p.
- DIOP, AT. 1987. Les ressources fourragères de l'aire pastorale de Tatki. Inventaire et étude du mode d'exploitation. Propositions de plan d'aménagement et de gestion rationnelle. ISRA Laboratoire national de l'élevage et de recherche vétérinaire, Dakar, Sénégal, 18 p.
- DIRECTION DE L'AGRICULTURE DAKAR SÉNÉGAL. 1986. "Analyse de la situation dans les zones sylvo-pastorales nord et sud du Sénégal". Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens Dakar Sénégal (3-8 novembre 1986), 26 p.
- DUBECCO, R., et H. GINSBERG. 1917. Virology. Harper and Rew publishers- hagestown, 1261 p.
- DUFFOUR, A.P., E.R. STICKLAND et J. CABELLI. 1981. "Membrane filter method for enumerating Eschericia coli". Applied and environmental microbiology, vol. 41 no. 5, p. 1152-1158.
- EDWARDS, KA., G.A CLASSEN et E.H.J. SHROTEN. 1988. "L'exploitation des

ressources hydrauliques en Afrique tropicale". C.I.P.E.A, rapport de recherche no. 6 (décembre), 111 p.

ELVIDGE, C.D., et R.J.P. LYON. 1984. "Influence of rock-soil spectral vegetation on the assessment of green biomass". Remote Sensing of Environment vol. 17, pp. 265-279.

FREDERIKSEN, P., et J.E. LAWESSON. 1992. "Vegetation types and patterns in Senegal based on multivariate analysis of fields and NOAA-AVHRR satellite data". Journal of Vegetation Science, vol. 3, p. 535-544.

GANNON, J.J., M.K. BUSSE et J.E. SCHILLINGER. 1983. "Fecal coliform disappearance in a river impoundment". Water resources, vol. 17 no. 11, p. 1595-1601.

GELDREICH, E.E., R.H. BORDNER., C.B. HUFF., H.F. CLARK et P.W. KABLER . 1962. "Type distribution of coliform bacteria in the fèces of warm-blooded animals". Journal WPCF, p. 295-301.

GIRARD, C.M., et M.C. GIRARD. 1975. Application de la télédétection à l'étude de la biosphère. Collection Sciences agronomiques Masson(ed), 186 p.

GIRARD, MC., et C.M. GIRARD. 1989. Télédétection appliquée zones tempérées et intertropicales, Masson, 260 p.

GNINGUE, DI. 1990. "Relation entre charges animales et équilibre écologique : son impact sur les productions animales dans le contexte du Ferlo sableux sénégalais". Thèse M.Sc Université Laval.

GROSMAIRE, 1957 . Eléments de politique sylvo-pastorale au Sahel sénégalais. Saint-Louis, Service des eaux et forêts.

GROTEN, S.M.E. 1993. "NDVI crop monitoring and early yield assesment of Burkina Faso". International journal of remote sensing vol. 14 no. 8, p. 1945-1515.

GROUSIS, M. 1988. "Structure, productivité et dynamique ses systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso)". Etudes et thèse de l'ORSTOM, septembre 88 336 p., ORSTOM Bondy.

GUÉRIN, H. 1983. Méthodologie de l'étude de la valeur alimentaire de parcours naturels à faible productivité. Première partie: approche méthodologique. Programme ABT LNERV Dakar, 21 p.

GUILLAUD, J.F., et L.A. ROMANA. 1990. "La mer et les rejets urbains", Actes de colloques no. 11- 1991, Bendor 13-15 juin 1990, Institut français de Recherche pour

l'exploitation de la mer.

GUYOT, G. 1984. "Caractérisation spectrale des couverts végétaux dans le visible et le proche infra-rouge; application à la télédétection". Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, vol. 95 no. 3, p. 5-22.

GUYOT, G. 1989. "Signatures spectrales des surfaces naturelles". Télédétection Satellitaire, tome 5. Paradigme, CAEN, France.

GYLES, C.L. 1984. Environmental aspects of Escherichia coli in human health. Conseil national de recherches Canada no 22490 Associate Committee on scientific criteria for environmental quality, 76 p.

HALIDOU, A. 1983. Problématique des réserves fourragères en élevage extensif. FAPIS Dakar Sénégal. 21 p.

HAUDURC. Y. P. 1947. Microbiologie générale et technique microbiologique. Masson & C^{ie} Paris - F Roth et C^{ie} Lausanne, 623 p.

HEILMAN, J.L., et M.R. KRESS. 1987. "Effects of vegetation on spectral irradiance at the soil surface". Agron. Journal, vol. 79, p. 765-768.

HOLBEN, B.N. 1986. "Characteristics of maximum-value composit images from temporal AVHRR data". International Journal of Remote Sensing vol. 7 no 11, p. 1417-1437.

Le HOUÉROU, H.N. 1980. Les fourrages ligneux en Afrique. Etat actuel des connaissances. Ed par Le Houérou Centre International pour l'élevage en Afrique, Addis Abéba, Ethiopie, 481 p.

Le HOUÉROU, 1989. "The grazing land ecosystems of the african Sahel". Ecological studies, no. 75, 282 p.

HUÈTE, A.R., D.F. POST., et R.D. JACKSON. 1984. "Soil spectral effects on 4-space vegetation characteristics on arid rangelands". Remote Sensing of Environment, vol. 15, p. 155-165.

HUÈTE, A.R. 1985. "Spectral response of plant canopy with different soil backgrounds". Remote sensing of Environment, vol. 17, p. 37-53.

HUÈTE, A.R. 1987. "Soil and Sun angle interactions on partial canopy spectra". International Journal of Remote Sensing, vol. 8, p. 1307-1317.

HUÈTE, A.R. 1988. "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)". Remote Sensing of

Environment, vol. 25, p. 295-309.

HUÈTE, A.R., D.F. POST., et R.D. JACKSON. 1984a "Soil spectral effects on 4-space vegetation discrimination". Remote Sensing of Environment, vol. 15, p. 155- 165.

IRO, A., M. YERGEAU et G.B. BÉNIÉ. 1989. "Utilisation de la télédétection pour l'aménagement agricole au Sahel" Séminaire de l'UREF, Dakar, Sénégal, pp. 121-127.

KAUFMAN, Y.J., et B.N. HOLBEN. 1993. "Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection". International journal of Remote Sensing 1993, vol. 14 no 1, p. 21-52.

KOTT, Y. 1981. "Viruses and bacteriophages", Sci total env, vol. 18, p. 13-23.

KOUDA, M. 1981. "Analyse synchronique et diachronique de l'évolution de la végétation en zone semi-aride (Haute Volta) par télédétection multispectrale". Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse, 143 p.

LARPENT, J.P et M. LARPENT-GOURGAUD. 1970. Microbiologie pratique. Hermann Paris, 204 p.

LATTANZI, W.E. et E.W. MOOD. 1951. "A comparison of enterococci and *E. coli* as indices of water pollution", Sewage and industrial wastes, vol. 23, p. 1154-1160.

MAIGNIEN, R. 1965. Notice explicative de la carte pédologique du Sénégal au 1/1000.000^e. ORSTOM, Dakar, 130 p.

MAJOR, DJ., F. BARET et G. GUYOT. 1990. "A ratio vegetation index adjusted for soil brightness". International Journal of Remote Sensing, vol. 11 no. 5, p. 727-740.

MARKS, M. 1990. "Rapport de la quatrième campagne d'enquêtes aériennes : suivi des paysages", CSE Publications, 8 p.

MATTHEWS, R.E.F. 1980. Classification et nomenclature des virus, troisième rapport du Comité International de Taxonomie des Virus, Masson, Paris.

MINISTÈRE DES APPROVISIONNEMENTS ET SERVICES. 1991. Groupe de travail fédéral - provincial sur la qualité des eaux usées à usage récréatif du comité consultatif provincial - de l'hygiène du milieu et du travail: Recommandations sur la qualité des eaux usées à des fins récréatives au Canada. Ministère de la santé nationale et du Bien-être social, 110 p.

MINISTÈRE DE LA PROTECTION DE LA NATURE DAKAR SÉNÉGAL, 1987.

Rapport du groupe interministériel chargé de la formulation d'une politique de développement de points d'eau en milieu rural en vue de la satisfaction des besoins du cheptel Dakar, 1987, 46 p.

MITCHELL, R. 1972. Water pollution microbiology. Wiley-interscience a division of John Wiley & Sons, Inc. NY - London - Sydney - Toronto, 412 p.

NGESSILAR, B. 1983. Aménagement des points d'eau en milieu rural. Rapport de stage, FAPIS, novembre, 13 p.

OMS, 1979. "Les virus humains dans l'eau, les eaux usées et le sol. Organisation Mondiale de la Santé", Série des rapports techniques, no. 639, Genève, 5 p.

PENNING DE VRIES, F.W.T. et M.A. DJITÉYE, 1982. La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. PUDOC Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 525 p.

POUPON, H. 1980. "Structure et dynamisme de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal". Travaux et documents de l'ORSTOM no 115, ORSTOM Paris, 351p.

PRÉVOST, Y. 1990. "Analyse spatiale de la pression animale comme facteur de désertification dans le nord du Sénégal". Journées scientifiques de Thiès (21-24 novembre 1989). Téledétection et sécheresse ED AUPELF-UREF, p. 241-251.

PRINCE, S.D. 1991. "Satellite remote sensing of primary production : comparaison of results for Sahelian grasslands 1981-1988". International journal of remote sensing, vol. 12 no 6, p. 1301-1311.

Qi, J. *et al.*, 1993. "Interpretation of vegetation indices derived from multi-temporal SPOT images". Remote Sensing of Environment, vol. 44, p. 89-101.

Qi, J. *et al.*, 1994. "A modified soil adjusted vegetation index". Remote Sensing of Environment, vol. 47, p. 1-25.

REASONER D.J. et E.E. GELDREICH. 1989. "Detection of fecal coliform in water by using [¹⁴C] mannitol". Applied and environmental microbiology, vol. 55 no. 4, p. 907-911.

REASONER, D.J. 1980. "Microbiology : detection of bacterial pathogens and their occurrence". Journal WPCF, vol. 52 no. 6, p. 1812-1833.

RICHARDSON, A.J., et C.L. WIEGAND. 1977. "Distinguishing vegetation from soil background information". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 43 no. 12, p. 1541-1552.

RIDDER N. *et al.* "La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle". Texte des cours PPS, Tome 2, travaux pratiques, Université agronomique, Wageningen.

SABRÉ, K. 1982. Mémoire sur l'intervention de l'Etat dans la gestion des ressources pastorales. EISMV, Dakar.

SANTIAGO-MERCADO J., et T.C. HAZEN. 1987. "Comparison of four membrane filter methods for fecal coliform enumeration in tropical waters", Applied and environmental microbiology, vol. 53 (December), p. 2922-2928.

SERRES, H. 1980. Politique d'hydraulique pastorale. ACCT, PUF, 118 p.

SISSOKHO, M. 1985. Méthodes d'évaluation des paramètres zootechniques et de la productivité des troupeaux en zone sylvo-pastorale sahélienne : l'exemple de la zone sylvo-pastorale au Sénégal, 139 p.

SODESP, 1984. Étude socio-économique de la zone de naissance de Mbar Toubab (Rapport provisoire).

SYLLA, C. 1984. "Phytoécologie et problèmes sylvo - pastoraux dans la savane sahélienne de Mbiddi, Nord Sénégal". Thèse (M. SC) Université Laval.

THÉBAUD, B. 1988. Elevage et développement au Niger. Quel avenir pour les éleveurs du Sahel?. Réflexion sur les causes de la crise pastorale à partir de la situation de l'élevage dans l'Est du Niger. Bureau international du travail, Genève, 146 p.

THÉBAUD, B. 1990. "Politiques d'hydraulique pastorale et gestion de l'espace au Sahel". Sociétés pastorales et développement. Cahiers des sciences humaines ORSTOM, vol. 26 no. 1-2, 1990, 31 p.

TOURÉ, IMA. 1986. "Éléments pour une étude quantitative et qualitative de la végétation du Ferlo sénégalais : phase de terrain". Fr.FAPIS Dakar, Sénégal. Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens Dakar, Sénégal, 112 p.

TOURÉ, O. 1987. "Une société en mutation sous l'effet des politiques de développement. Les peul du Ferlo, du début du siècle à nos jours". Etudes et travaux de l'USED, no. 8 (juin), 107 p.

TOURÉ, O. 1990. "Ngaynaaka majji : La perte des pratiques pastorales dans le Ferlo (Nord Sénégal)". International Institute for Environment and Development, dossier no. 22, 25 p.

TRAORÉ, K. *et al.*, 1993. "Cartographie opérationnelle des ressources en eau de surface au

Burkina Faso", Cinquièmes Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'UREF, TUNIS.

TUCKER C.J. 1979. "Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation". Remote Sensing of Environment, vol. 8, p. 127-150.

TUCKER, C.J., *et al.*, 1983. "Satellite remote sensing of total dry matter production in the Senegalese Sahel". Remote sensing of Environment, vol. 13, p. 461-474.

TUCKER, C.J., *et al.*, 1985. "Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel : 1980-1984". Remote sensing of Environment, vol. 17, p. 1571-1581.

TRICART, J., *et al.*, 1976. "Apports de la télédétection à l'étude des régions arides et subarides", journées d'étude organisée le 9 avril au CNEAT, Strasbourg, 67 p.

VALENZA, J., et A.K. DIALLO. 1972. "Les pâturages naturels du Ferlo nord". ISRA/LNERV - Dakar; 80 p. Etudes agrostologiques, no. 34 (juin).

VON MAYDELL, H.J. 1990. Arbres et arbustes du Sahel. Leurs caractéristiques et leurs utilisations. Verlag josef margraf, Scientific Books.

WANADA, R.B., et M.W. GILLILAND. 1988. "Bacterial pollution in runoff from agricultural lands", Journal of environmental quality, vol. 17 no. 1, p. 27-34.

WILL, A.W., S.L. DIESH et B.S. POMEROY. 1973. "Survival of salmonella Typhimurium in animal manure disposal in a model oxidation ditch". AJPH avril, vol. 63 no 4, pp. 322-330.

YERGEAU, M., G.B. BÉNIÉ., C. PRÉVOST., R. SIMARD., F. BONN et Q.H.J. GWYN. 1989. "L'inventaire et l'aménagement des ressources au Sahel, un exemple de transfert de technologie en télédétection", Séminaire de l'UREF, Dakar, Sénégal, pp. 283-295.

YERGEAU, M., G.B. BENIÉ., F. BONN et C. PRÉVOST. 1991. "Satellite et gestion de l'eau au Sahel, Science et changements planétaires", Sécheresse, no 1 vol. 2, pp. 48-60.