

FONDATION UNIVERSITAIRE LUXEMBOURGEOISE

185, avenue de Longwy  
B - 6700 Arlon

~~III 6804~~  
Thèses et mémoires FUL  
Mémoires DEA

# UTILISATION DE LA TELEDETECTION pour le suivi des parcours en zone agro-pastorale sahélienne

Etude comparative de deux indices  
de végétation : le **TSAVI** et le **NDVI**  
dans l'ouest du NIGER

par  
Bakary **DJABY**

Travail présenté dans le cadre  
du Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA)  
en Sciences de l'Environnement  
option : AGROMETEOROLOGIE

Fondation Universitaire  
Luxembourgeoise  
Centre de Documentari

Promoteur : Dr. Bernard TYCHON  
Co-promoteur : Dr. Pierre HIERNAUX

Novembre 2000

## TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	a
Résumé .....	b
<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ELEVAGE ET SECURITE ALIMENTAIRE.....</b>	<b>6</b>
1.1. Importance de l'élevage dans les pays du C.I.L.S.S. ....	6
a) Importance numérique.....	7
b) Productions animales et fonctions de l'élevage sahélien.....	7
1.2. Bilan alimentaire du Sahel: place des produits animaux .....	10
1.3. Problématique de l'élevage dans la sécurité alimentaire au Sahel .....	11
a). Concept de disponibilités au niveau des productions animales.....	12
b). Stabilité et accessibilité aux productions animales.....	14
c). Prise en compte l'élevage dans les systèmes d'alerte précoce	15
Conclusion partielle.....	20
<b>2. LA ZONE D'ETUDE.....</b>	<b>22</b>
2.1. Présentation du Niger.....	22
a) La démographie .....	24
b) Le climat, la végétation, et les ressources en eau.....	24
c) Les sols du Niger.....	29
d) Les activités de production agropastorale.....	29
2.2. Les terroirs du Fakara.....	35
a) Présentation de la zone.....	35
b) Le relief, les sols et la végétation.....	35
c) Démographie et activités des hommes.....	39
d) Le système d'information environnemental sur les terroirs du FAKARA	40
<b>3. CHOIX D'UN INDICE POUR LE SUIVI DE LA VEGETATION.....</b>	<b>48</b>
3.1. Les images satellitales utilisées.....	48
a) Les données de NOAA-AVHRR.....	48
b) Les données SPOT VEGETATION.....	49
3.2. Choix d'un indice complémentaire pour le suivi de la végétation au Sahel	51
a) Les indices de végétation.....	52
b) La ligne des sols.....	60
Conclusion préliminaire.....	70
<b>4. ETUDE DES INDICES TSAVI ET NDVI DANS LA ZONE OUEST DU NIGER.....</b>	<b>72</b>
4.1 Méthodes.....	72
4.2. Etude de la variation saisonnière et de la sensibilité des indices.....	74

a) Les indices maximum et minimum de la zone.....	74
b) L'allure générale des courbes.....	75
c) Le ndvi NOAA-AVHRR et le ndvi SPOT-VEGETATION.....	76
d) Le profil saisonnier des 23 villages de référence.....	79
e) La sensibilité des indices autour de la ligne des sols .....	81
4.3 La classification de la zone ouest du Niger.....	83
a) les types de sols .....	85
b) Les indices des différents types de sols.....	86
c) Analyse des canaux rouge et proche infra rouge.....	91
d) La classification supervisée de la zone d'étude.....	93
Conclusion partielle.....	100
<b>5. L'EVALUATION DE LA PHYTOMASSE HERBACEE.....</b>	<b>102</b>
5.1 Etat de l'art dans les pays du Sahel.....	102
a) La prise en compte des paramètres collectés au sol.....	103
b) L'introduction du NDVI dans le modèle.....	105
c) Les produits issus des modèles.....	109
d) Leçons pour la présente étude.....	110
5.2 Evaluation de la production herbacée dans le FAKARA.....	111
a) Méthodologie d'approche.....	111
b) Méthode de collecte des données.....	111
c) Problématique des données sol avec les données satellitaires.....	113
d) Préparation des données de production végétale pour la calibration...	114
e) Détermination de la date de démarrage pour la période d'intégration...	117
f) Evaluation de la biomasse herbacée .....	119
Conclusion partielle.....	135
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>137</b>
Bibliographie.....	i
Annexes.....	A
Liste des tableaux.....	I
Liste des graphiques.....	J
Liste des cartes.....	K

## Remerciements

Dans le cadre du travail présenté ici, je remercie particulièrement mon promoteur, Dr Bernard Tychon, premier assistant en Agrométéorologie à la FUL pour la confiance placée en ma personne et son appui scientifique permanent tout au long de ce travail. Mes discussions avec lui dans ce processus ont été riches d'enseignement tant pour moi que pour lui, car l'humilité de l'homme est grande.

Je suis particulièrement reconnaissant à Dr Pierre Hiernaux, co-promoteur de ce travail, que je considère comme mon guide scientifique car il m'a toujours donné l'exemple du chercheur qui allie le « terrain » au « bureau ». Ses critiques et orientations au cours de ce travail m'ont amené à aller toujours de l'avant pour tendre un jour vers un bon scientifique. Sans lui, aucune donnée de terrain ne serait disponible pour ce travail.

Au cours de cette année scolaire, j'ai eu la chance d'avoir des enseignants que je connaissais à travers leurs publications scientifiques. Ce sont Dr Engels P. en Pédologie, Dr Etienne Bartholomé en Télédétection, et Dr Buldgen André en Zootechnie, qui, en plus de leur cours, ont pu dégagé du temps pour discuter avec moi sur mon projet de DEA et celui futur de thèse. Leurs idées m'ont permis de trouver le chemin pour le présent travail. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

je suis très reconnaissant au Directeur Général du Centre Régional AGRHYMET, Mr Alhassane Adama Diallo et son staff, en particulier Dr Sankung Sagnia et Mr Faustin Gnomou, qui ont toujours eu à l'esprit que la formation est un grand investissement pour le Sahel. Sans eux, cette formation n'aura pas lieu.

je remercie le personnel de la FUL, du Centre Régional Agrhymet et de l'ILRI, qui grâce à leur concours m'ont permis d'avancer dans cette recherche dans les meilleures conditions qui soient.

je n'oublies pas mes deux petits frères, DIABY MOUSSA NAMOKO et SOULEYMANE TOURE qui ont été toujours présents à mes cotés lors des moments difficiles en Belgique. Ceci m'a permis d'avancer dans ce travail. Qu'ils trouvent ici, toute ma reconnaissance fraternelle.

## RESUME

L'importance des terres de parcours au Sahel a depuis les sécheresses, favorisé l'observation des ressources pastorales par la télédétection basse résolution. Parmi les indices de végétation issus des images fournies par les différents senseurs, le NDVI est le plus couramment utilisé. Plusieurs travaux ont montré que cet indice est affecté par les variations des propriétés spectrales des sols. Cette caractéristique limite la détection de la végétation dans les milieux à couvert végétal faible comme en zone agropastorale sahélienne. Afin de pallier cette insuffisance du NDVI, plusieurs autres indices ont vu le jour comme le TSAVI dont les caractéristiques se sont montrées performantes en milieu expérimental pour le suivi de la végétation éparse. Au cours de ce travail, le TSAVI est élaboré et utilisé en mode opérationnel en comparaison avec le NDVI. Les deux indices utilisés sont issus des images de SPOT-VEGETATION, le nouveau senseur européen opérationnel depuis 1998. Cette comparaison est faite à travers l'évolution au cours de la saison des deux indices et l'évaluation de la phytomasse herbacée dans un milieu où l'occupation des sols est connue. Les résultats obtenus montrent que le TSAVI diffère très peu du NDVI au cours de la période de végétation active. Les différences observées résident dans la capacité du TSAVI à identifier les zones d'émergence précoce de la végétation, en début de saison des pluies. Dans une classification supervisée avec la signature indiciaire des sols de la région du Fakara, le TSAVI se montre plus performant avec une erreur d'omission inférieure de 10% à celle du NDVI. Dans l'évaluation de la phytomasse herbacée, les relations obtenues montrent que le NDVI est plus indiqué que le TSAVI. Malgré l'utilisation de données sur l'occupation des sols, les relations obtenues entre les indices et les masses végétales sont faibles. Cette faiblesse des relations est en partie liée au morcellement du territoire en milieu agropastoral sahélien. En revanche, dans les zones qui apparaissent homogènes, les résultats indiquent des liaisons fortes entre les indices et la masse végétale des mauvaises herbes. Les zones agropastorales du Sahel semblent plus indiquées dans un suivi qualitatif avec la télédétection basse résolution. La complexité de l'occupation des sols liée à plusieurs facteurs peut cependant être abordée avec une combinaison télédétection haute résolution et basse résolution pour une amélioration de l'information sur la sécurité alimentaire au Sahel.

**mots clés :** agropastorale, élevage , indice de végétation, biomasse végétale, télédétection, sécurité alimentaire, sols.

## Introduction

Le Sahel comme plusieurs parties de l'Afrique au Sud du Sahara, est confronté à la satisfaction des besoins alimentaires de sa population humaine au sens de la sécurité alimentaire définie au sommet mondial de l'alimentation en 1996. Cette définition stipule que " *La sécurité alimentaire existe lorsque tous les êtres humains ont, à tout moment, un accès physique et économique à une nourriture suffisante, saine et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques et leurs préférences alimentaires pour mener une vie saine et active* " (FAO, 1996) .

Pour faire face à cette situation, des systèmes d'alerte précoce ou rapide ont été mis en place comme des instruments d'investigation conjoncturelle qui sont à même de prévoir les moments de crise alimentaire et d'apprécier leur ampleur (Agrhymet, 1996b). Les actions conduites par ces systèmes portent sur le déroulement des campagnes agricoles et les prévisions de récolte, l'évaluation des déficits ou excédents alimentaires et la surveillance des zones à risque. Les produits d'information qui y sont issus sont orientés vers les décideurs et les techniciens.

Les outils et instruments utilisés dans les systèmes d'alerte précoce se basent sur des réseaux d'observation au sol. La densité et la qualité de ces réseaux ne permettent pas de répondre à la diversité des situations qui se présentent ( Prince et al, 1990). Aussi, l'utilisation d'autres sources d'information et de données, en l'occurrence les données satellitales connaît depuis la dernière décennie des progrès considérables dans le suivi des campagnes agricoles aussi bien à l'échelle nationale, régionale que mondiale. Cette nouvelle technologie est surtout utilisée dans les domaines relatifs à l'estimation des pluies, l'inventaire des parcours et la surveillance de la production, la gestion des eaux de surface, la gestion et l'exploitation des eaux souterraines, l'occupation et l'utilisation des sols, la surveillance et la modélisation de la production agricole, la surveillance des organismes nuisibles et des maladies, la surveillance des feux de brousse, la dégradation des sols et la surveillance de l'érosion, etc.. La notion de parcours englobe toutes les terres dont la production végétale est utilisée par le bétail pour s'alimenter. Elle est indépendante de la saison.

Dans le cas de l'agriculture, les données satellitales ont été surtout utilisées dans l'estimation des rendements agricoles. Dans le domaine pastoral, la problématique de suivi des parcours du bétail a été abordée dans plusieurs travaux de recherche. En effet, l'alimentation du bétail au Sahel est essentiellement liée à la disponibilité de phytomasse dans les parcours et à sa gestion. Pour les agropastoralistes, la connaissance de cette donnée de base sur les grands espaces pâturés du Sahel doit permettre de fournir d'une part des informations sur les disponibilités actuelles et d'autre part d'améliorer la connaissance de ces parcours dans l'optique de la gestion rationnelle des ressources naturelles.

Avec l'apparition des sécheresses successives de 1974 et de 1984, les systèmes d'alerte précoce se sont intéressés de plus en plus à l'élevage. Cet intérêt est surtout lié à l'importance des pertes enregistrées sur le bétail et la précarité des conditions de vie des éleveurs. Les actions entreprises ont surtout porté sur l'amélioration de l'information sur les quantités de matière sèche produites par les pâturages et la qualité des parcours au cours de la saison végétative. Celles ci se sont surtout heurtées à la dimension des espaces pâturés et à la variabilité climatique observée au Sahel. Les mêmes raisons ont été préjudiciables à une extrapolation des données pour la connaissance instantanée de la production des parcours à l'échelle régionale (UNESCO, 1979) et ce, malgré l'apport méthodologique considérable dans la connaissance quantitative et qualitative des parcours. Un tel travail à grande échelle resterait coûteux, et destructeur des végétaux.

Avec l'apparition de la télédétection, dont certains produits assurent une couverture temporelle et géographique des parcours sahéliens, et depuis les travaux menés par Tucker et al. en 1983, l'évaluation des parcours sur de grands espaces devenait alors possible. La qualité des résultats obtenus a conduit à l'utilisation de plusieurs sources d'images satellitales en l'occurrence NOAA-AVHRR<sup>1</sup>, et le nouveau senseur SPOT-VEGETATION dont les images sont disponibles depuis 1998 (Begue et al., 1998).

---

<sup>1</sup> The Advanced Very High Resolution Radiometer

Malgré ces progrès, le constat est que jusque là, les produits issus de l'utilisation de l'imagerie satellitale NOAA-AVHRR et très récemment SPOT VEGETATION sont restés dans le domaine de la recherche. Le niveau géographique atteint par ces recherches reste aussi très localisé à l'exception du Sénégal qui assure le suivi de la végétation sur 14 sites depuis 1987. L'utilisation de ces produits par les systèmes d'alerte précoce est presque inexistante. Les essais de comparaison des travaux conduits dans plusieurs pays du Sahel, en vue d'une extension géographique des modèles, tout en montrant l'existence d'écarts faibles dans les modèles existants (Prince, 1991) n'ont pas été concluants à cause des différences observées entre senseur, et la grande variabilité du couvert végétal des espaces sahéliens.

Les indices de végétation courants utilisés pour le suivi des parcours combinent les valeurs de réflectance des canaux rouge et proche infra rouge issues de ces senseurs. Parmi ceux ci, l'indice normalisé de végétation ( NDVI) issu du senseur AVHRR s'est montré comme l'un des indices le plus performant dans cette évaluation en offrant le meilleur compromis entre résolution spatiale, résolution spectrale, fréquence et couverture (Prince, 1991). Ces potentialités du senseur AVHRR et du NDVI ont été largement évoquées dans trois revues spéciales, dont deux du « International Journal of remote sensing » en 1986 et 1991 et par les mêmes auteurs dans une publication de la communauté Européenne (Prince et al, 1993).

Dans ces études, l'arrière plan sol se révèle comme l'un des facteurs qui influencent fortement les relations couvert végétal, senseur et modèle de production, car il perturbe le signal. Pour atténuer ce bruit, les indices de végétation ont été testés localement afin de suivre la végétation dans les zones arides et semi-arides (Leeuwen et al., 1993 ; Bannari et al., 1996 ). Parmi les indices qui ont permis d'améliorer les modèles de production primaire ou d'évaluation du couvert végétal dans les zones arides à végétation localisée, le TSAVI<sup>2</sup> s'est montré particulièrement performant (Lo Seen et al, 1995 ; Bannari et al, 1996). Cependant, la plupart des travaux sur cet indice se sont limités aux données issues de radiomètres et dans des zones très restreintes.



Pour l'évaluation des parcours, l'absence de « vérité terrain », en l'occurrence l'occupation des sols a été aussi une limite à la vulgarisation des méthodes et outils issus de la télédétection au Sahel. Cette occupation des sols en zone agro-pastorale sahélienne est morcelée et variable dans le temps. Ceci a été préjudiciable aux modèles jugés performants. Les transferts à grande échelle de ces modèles ont été aussi des échecs à cause de ce problème de vérité terrain, car les résultats obtenus diffèrent peu des connaissances acquises depuis longtemps sur la variation latitudinale de la production végétale en zone sahélienne.

Sur cette base, les questions qui ont orienté le présent travail sont les suivantes :

- Quel est l'apport d'un indice qui améliore l'effet sol sur le suivi des parcours par télédétection dans les zones agro-pastorales du Sahel ?
- Quel est l'impact d'une meilleure connaissance de l'occupation des sols sur l'évaluation de la phytomasse herbacée des parcours dans ces zones agro-pastorales du Sahel ?

Pour répondre à ces différentes questions dans le cadre du présent travail, le TSAVI est calculé à l'échelle décadaire sur l'ensemble du Niger, pour l'année 1998 à partir des réflectances du canal rouge et proche infra rouge de SPOT VEGETATION. Les études menées sur cet indice au cours de ce travail portent sur :

- son évolution saisonnière en 1998 en comparaison avec celle du NDVI dans des villages situés dans l'Ouest du Niger où des mesures sur la végétation sont effectuées.
- une classification supervisée de l'ouest du Niger qui utilise les données décadaires du TSAVI et le NDVI est réalisé aux fins de comparaison avec les types de sols existants. Cette démarche de comparaison d'une classification d'indice de végétation avec les sols dérive de l'hypothèse

---

<sup>2</sup> Transformed Soil adjusted Index

d'une plus grande influence du facteur sol sur la production végétale dans une zone où la variabilité spatiale de la pluviosité annuelle est faible.

- sur la base des mesures de masse végétale réalisées en fonction de l'occupation de sol, les deux indices sont calibrés en vue de la recherche d'un modèle d'évaluation de la masse végétale herbacée en milieu agropastorale de l'Ouest du Niger. Cette calibration est réalisée sur les sites du FAKARA situés dans l'Ouest du Niger où l'occupation du sol est connue et prise en compte dans les mesures de masse végétale réalisées par l'ILRI<sup>3</sup> dans le cadre d'une recherche sur le transfert de fertilité en zone semi-aride.

Avant d'aborder ces aspects relatifs à la télédétection, une revue de la place de l'élevage dans la sécurité alimentaire est faite dans un premier temps pour situer le cadre complexe de cette spéculation au Sahel. Dans un second temps, les zones sur lesquelles sont menées les différentes études sont présentées.

---

<sup>3</sup> International Livestock Research Institute

## **1. ELEVAGE ET SECURITE ALIMENTAIRE**

L'aggravation des problèmes d'alimentation au Sahel et dans certaines parties du monde depuis les sécheresses des années 1970 a engendré une évolution des concepts stratégiques de lutte contre la faim et la malnutrition. Le concept de sécurité alimentaire a été retenu en lieu et place de celui de l'autosuffisance alimentaire limitée à la satisfaction des besoins par les seules productions nationales.

Dans les approches développées au Sahel sur les dispositifs d'information en matière de sécurité alimentaire, l'accent a été surtout mis sur les productions céréalières. Les productions pastorales ont été marginalisées malgré leur importance dans l'alimentation des populations et l'économie des pays sahéliens. Cette marginalisation a été plusieurs fois dénoncée dans les différentes tribunes régionales sur la sécurité alimentaire. L'un des objectifs du présent travail est le développement des systèmes d'information sur les productions animales. Aussi, dans le présent chapitre, l'importance de l'élevage dans les pays sahéliens est abordé, de même que les différents concepts de sécurité alimentaire vu sous l'angle des productions animales. Dans la dernière partie du chapitre, la place actuelle de l'élevage dans les systèmes d'alerte précoce et les perspectives offertes par l'expérience du Centre Régional Agrhymet dans ce domaine sont traités.

### **1.1. Importance de l'élevage dans les pays du C.I.L.S.S**

L'élevage représente 10 à 20% du produit intérieur brut, et 14 à 30% des ressources d'exportation des pays du Sahel. De type traditionnel, il repose essentiellement sur l'utilisation des parcours libres pour son alimentation. Il assure la sécurité alimentaire des ménages et constitue une protection efficace contre les incertitudes liées à la sécheresse (BAD, 1998).

## a) importance numérique

Les effectifs du cheptel des pays membres du CILSS sont estimés en 1998 à environ 22 500 000 bovins, 64 500 000 petits ruminants, 2 600 000 camelins, 1 015 000 équins, 1 994 000 Porcins et 2 450 000 asins. (cf. tableau 1.1 ).

Sur le plan continental, le Sahel détient 11% des bovins, 16% des petits ruminants, 18% des camelins, 20 % des équins et 9% des porcins <sup>1</sup>.

## b) productions animales et fonctions de l'élevage sahélien<sup>2</sup>

Les productions et les fonctions de l'élevage sahélien sont multiples. En plus des productions alimentaires (viande, lait, œuf, abats), l'élevage joue un grand rôle dans l'exploitation familiale par l'apport de force de travail (transport et culture attelée) et l'apport d'énergie (feux, enduits, biogaz). L'apport de fumier et la force de travail par l'élevage contribue fortement à la réussite des activités agricoles (Piroux et al., 1997). Deux autres fonctions essentielles sont le rôle économique (apport d'argent liquide par les ventes, existence d'un capital sécurité) et le rôle social.

La viande et le lait sont les produits alimentaires les plus courants tirés de l'élevage sahélien. La viande sahélienne est consommée localement et exportée sur pied vers les pays côtiers de l'Afrique de l'Ouest. Toute la production laitière est consommée localement.

**Tableau 1.1: Effectifs du cheptel des pays du CILSS - Evaluation 1998**

Pays	Bovins	Ovins	Caprins	Camelins	Equins	Asins	Porcins
Burkina Faso	4 521 500	6 207 200	7 913 500	13 800	24 500	475 000	586 600
Cap-vert	21 500	8 800	110 000		600	13 500	636 000
Tchad	5 079 423	2 585 000	3 800 000	677 085	228 386	280 144	23 000
Gambie	346 295	181 580	250 199		18 700	35 000	14 000
Guinée-Bissau	475 000	255 000	270 000		1 850	4 900	310 000
Mali	5 725 000	5 950 000	8 550 000	365 000	135 000	650 000	65 000
Mauritanie	1 312 000	6 200 000	4 133 000	1 183 000	18 400	155 000	
Niger	2 100 000	4 100 000	6 150 000	392 000	82 000	450 000	39 000
Sénégal	2 913 000	4 239 000	3 572 000	7 500	506 000	376 000	320 000
<b>TOTAL CILSS</b>	<b>22 493 718</b>	<b>29 726 580</b>	<b>34 748 699</b>	<b>2 638 385</b>	<b>1 015 436</b>	<b>2 439 544</b>	<b>1 993 600</b>

Source: Organisation mondiale pour l'agriculture et l'alimentation - FAOSTAT 1998 et Base de données AP3A<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Les données sur la volaille ne sont pas comptabilisées

<sup>2</sup> les poissons et les abeilles ont été volontairement omis.

Malgré la renommée du Sahel comme "grand producteur de viande", La consommation de viande reste faible. En effet, selon les statistiques de la FAO, les consommations (toute viande comprise) par habitant et par an de 1990 à 1995 des 9 pays du Sahel varient entre 6,62 kg pour la Gambie et 21,74 kg pour le Cap-Vert. Les grands pays producteurs du Sahel ne dépassent guère 10 à 15 kg par an. Comparés aux pays développés, les Sahéliens consomment en moyenne par habitant 7 fois moins de viande et 3 fois moins que la moyenne mondiale. Cet indicateur est surtout lié au niveau de développement économique des pays. Son amélioration passe par des performances multisectorielles visant à accroître le revenu des populations (PNUD, 1995).

L'exportation sur pied des animaux représente en moyenne 3% du capital bétail par an depuis 1994. Sur les 9 pays du CILSS, cinq sont exportateurs de bétail. Ce sont le Mali, le Burkina Faso, la Mauritanie, le Niger et le Tchad. Pour ces pays sahéliens, les marchés côtiers représentent des débouchés sûrs et dès à présent, les sahéliens doivent adopter des stratégies qui permettent d'accroître leurs exportations avec des prix compétitifs et du bétail de bonne qualité. En effet, ce marché n'est pas encore saturé. Une étude menée par Crouail (1992) montre que la couverture des besoins des pays côtiers en viande par les exportations sahéliennes ne dépassera guère 35,3% de la demande en l'an 2000. Cette hypothèse vérifiée sur les années de grande exportation que sont 1994 et 1995, montre que les pays sahéliens exportateurs ont couvert respectivement 78.5% et 92.6% des importations de viande des pays côtiers. A l'intérieur du Sahel, l'importation de viande est négligeable. Le plus gros importateur de viande est le Sénégal.

Le potentiel laitier des vaches sahéliennes est faible. Les tentatives d'introduction de souches performantes de bovins et de petits ruminants au Sahel comme l'Azaouak et la chèvre rousse de Maradi n'ont pas permis d'atteindre les performances observées sur les races européennes ou américaines. Les écarts de production restent énormes. A titre d'exemple, une race zébu peul sur pâturage en élevage extensif produit en moyenne 540 kg de lait en 305 jours tandis qu'une vache canadienne produit 8 427 kg (Canadian dairy, 1998) avec une qualité meilleure soit

---

<sup>3</sup> Projet Alerte Précoce et Prévision des Productions Animales - Agrhymet - CILSS

un rapport de 1 à 16. A l'image de l'ensemble du continent africain qui possède en 1998, 15% du troupeau bovin mondial, et produit 4,4% de la production laitière mondiale, la région sahélienne avec 11 % du cheptel bovin africain ne produit que 3,2 % de la production laitière du continent.

Dans les pays du Sahel, aucune véritable politique de production laitière basée sur la sélection animale n'a été entreprise. En revanche, les pays du Sahel ont excellé depuis les indépendances dans l'importation de produits laitiers. De 1961 à 1996, le taux de croissance annuel des importations de produits laitiers (en équivalent lait) est de 8,4% et en devises monétaires de 10,6% (FAO, 1998). A titre d'exemple, en 1996, les pays du CILSS ont importé 300000 tonnes de produits laitiers pour une valeur de 106 millions de dollars US.

Les autres productions de l'élevage sahélien sont le travail, les cuirs et peaux et le fumier :

- Pour la traction animale, les évaluations récentes faites par Havard et al (1996) distinguent 4 types de développement de la traction animale en Afrique au sud du Sahara. Le pourcentage des exploitations agricoles qui disposent de cette énergie au Sahel varient de 25% au Burkina Faso et au Mali, à 90% dans le bassin arachidier au Sénégal et en Gambie. La tendance présentée dans l'étude montre un accroissement annuel de 1,5% à 5% du total des animaux de trait dans la région. Cet accroissement varie de 11 à 25% chez les chevaux, 4 à 18% chez les asins, et de 1,5 à 3,5% pour les bovins. L'espèce non signalée dans l'étude sus-citée est le dromadaire. Celle-ci est fortement utilisée dans le transport, et l'exhaure de l'eau en milieu urbain et rural au Niger. L'importance économique de l'utilisation des animaux pour l'approvisionnement en eau et en bois des centres urbains contribue aussi à accroître le revenu des populations dans les zones urbaines

- pour les cuirs et peaux, le marché international se caractérise par sa rigueur sélective. Malgré les importants progrès réalisés dans le circuit, la qualité des produits bruts sahéliens laisse à désirer. Un grand travail de formation le long de la chaîne de production reste à faire pour éviter les taux de pertes enregistrées dans les cuirs et peaux.

La production d'œufs est essentiellement traditionnelle et le circuit de distribution n'est pas organisé. Dans la plupart des pays du CILSS, l'œuf de consommation est importé des pays côtiers. La consommation annuelle par habitant du Sahel est de 1,12 kg soit 6 fois moins que la moyenne mondiale et 13 fois moins que la moyenne européenne.

En conclusion, l'élevage sahélien de part les productions animales, contribue à la sécurité alimentaire des populations à travers les produits alimentaires qu'il génère et son rôle dans l'apport de revenu monétaire dans l'économie familiale et nationale. Malgré cette contribution significative, l'élevage sahélien reste marqué par :

- une faible productivité des espèces
- un niveau de consommation alimentaire faible des produits animaux
- l'importation massive de produits laitiers
- une baisse de la contribution de l'élevage dans le produit intérieur brut des états
- un élevage extensif marqué par l'absence de techniques de productions améliorées

## **1.2 . Bilan alimentaire du Sahel: place des produits animaux**

Les dispositifs d'information sur la sécurité alimentaire existants au Sahel depuis une décennie ont pour objectif de produire le bilan céréalier annuel. Au CILSS, des tentatives d'établissement du bilan animalier ont été menées en 1992 par le Projet Diagnostic Permanent (DIAPER). Cette initiative s'est arrêtée en l'absence d'opérations véritables de collecte de données sur les productions animales à même d'assurer une fiabilité des informations à utiliser. Un bilan alimentaire qui prend en compte les productions animales alimentaires est une information capitale dans les stratégies de lutte contre la faim et la malnutrition au Sahel. A ce jour, seule la FAO a entrepris des travaux dans ce sens. Pour la FAO, un bilan alimentaire donne une idée d'ensemble des approvisionnements alimentaires d'un pays durant une période de référence bien spécifiée. Ce bilan permet l'examen détaillé de la situation alimentaire d'un pays en termes de taux de dépendance des importations, et la

compréhension des autres indicateurs pour l'analyse des politiques d'élevage (FAO, 1998). L'analyse de ces bilans alimentaires sur la période 1992 permet de dégager les conclusions suivantes sur la base du régime moyen par personne et par jour de 2700 kilocalories :

- Seul le Cap Vert dispose d'un régime convenable; les pays avec un niveau de nutrition critique correspondant à un seuil de pauvreté absolu sont le Tchad, le Niger et le Mali avec des apports de moins de 2100 kcal/hbt/jour
- Sur le plan des apports calorifiques spécifiques, le niveau convenable d'apports en produits végétaux est dépassé par le Cap Vert et la Guinée Bissau. En revanche, pour les produits animaux, seuls la Mauritanie et le Cap Vert ont un apport quotidien de plus de 425 kcal/j/tête. Le reste des pays du Sahel ne dispose pas d'un apport de plus de 200 kcal/jour/tête avec moins de 10% de la contribution calorifique totale.
- En termes d'apports protéiniques, on peut aisément constater que le déficit est plus prononcé au niveau des protéines animales. En effet, tandis que seules la Gambie et la Guinée Bissau n'atteignent pas le niveau moyen mondial des 46,1 g/jour/tête de protéines végétales, seul le Cap Vert dépasse le seuil pour les protéines animales qui est de 25,8 g/jour/tête. Une situation similaire se retrouve dans le bilan des graisses.

L'examen des bilans alimentaires qui distinguent les apports en produits végétaux ou animaux montre que la sous-alimentation et la malnutrition des populations sahéniennes se caractérise par un apport plus faible en produits animaux.

### **1.3. Problématique de l'élevage dans la sécurité alimentaire au Sahel**

Depuis 1983, le comité de la sécurité alimentaire mondiale (CSA) a opté pour un concept élargi de sécurité alimentaire à trois objectifs spécifiques : disponibilités suffisantes; stabilité de l'offre et des marchés des produits alimentaires; accès aux approvisionnements (FAO, 1989). Les forums ou les documents de référence sur la



sécurité alimentaire, traitent très peu des approvisionnements en produits animaux. Ils se limitent aux approvisionnements céréaliers. Les chapitres ci-dessous tentent de combler cette lacune.

#### **a) concept de disponibilités au niveau des productions animales**

Dans les pays du Sahel, les politiques et programmes de sécurité alimentaire ont surtout mis l'accent sur les céréales car celles-ci constituent plus des 3/4 de la ration journalière. Les pays d'élevage ont néanmoins entrepris des efforts dans le sens de l'amélioration des productions autres que céréales, en l'occurrence les productions animales dans les priorités de développement agricole.

Selon les pays, les axes suivants ont été dégagés :

- la mise en adéquation des politiques de production avec la protection de l'environnement
- le développement participatif par l'implication des sociétés paysannes et des organisations professionnelles à tous les niveaux de décision
- le développement de la filière de commercialisation du bétail et de la viande
- la valorisation des produits et sous-produits animaux
- le désengagement et une nouvelle définition du rôle de l'Etat et des privés dans le développement de l'élevage.
- le développement de la recherche sur l'élevage

Autour de ces stratégies, les actions conduites au niveau des pays ont permis d'améliorer un tant soit peu les disponibilités en produits animaux. Ces actions s'articulent autour des points suivants:

- la poursuite des programmes de couverture sanitaire dont une des conséquences est l'accroissement des effectifs du cheptel dans tous les pays du Sahel après les sécheresses des années 1970 et 1980 .

- la poursuite des programmes qui visent à une plus grande utilisation des sous-produits agro-industriels, des résidus de récolte, et une meilleure utilisation des pâturages par le stockage du fourrage et la création de points d'eau. Avec ces actions, s'est développé un élevage semi-intensif dans les zones urbaines et périurbaines pour l'embouche, la production laitière et de viande à partir des animaux à cycle court (lapins, volailles)

Dans les organismes comme le CILSS, dont le mandat couvre tous les aspects liés à la recherche sur la sécurité alimentaire, l'importance accordée à l'élevage a permis aux pays une meilleure définition de leur politique de production. Ces politiques prennent désormais en compte la place de l'élevage dans la gestion des ressources naturelles, l'intégration agriculture élevage, le développement de l'information sur les productions animales. Un grand intérêt est désormais accordé à la maîtrise des circuits de commercialisation par la promotion des exportations dans le couloir central (Sidibé, 1998). Le couloir central comprend le Burkina Faso, le Mali, la Côte d'Ivoire et le Ghana. C'est une zone active de commercialisation du bétail à l'image des couloirs Est et Ouest dans le reste de l'Afrique Occidentale.

A la lumière de ces actions et de l'état des productions animales, les disponibilités en produits animaux se caractérisent par :

- L'importance des effectifs animaux avec un déséquilibre croissant par rapport à la disponibilité de ressources naturelles pour nourrir le bétail ;
- Le dynamisme des pays sahéliens dans la commercialisation du bétail vif ;
- Une faible productivité du bétail caractérisée surtout par la faiblesse des performances laitières qui occasionnent des importations de produits laitiers ;
- La sensibilité du secteur aux phénomènes climatiques.

## **b) stabilité et accessibilité aux productions animales alimentaires**

Les productions animales au Sahel sont soumises à plusieurs aléas qui compromettent un approvisionnement régulier. Ces aléas sont le climat, les variations de l'offre et de la demande sur les marchés, l'éloignement des parcours par rapport aux marchés. Dans les pays du Sahel, la disponibilité permanente de produits animaux sur les marchés et dans l'alimentation animale (la viande surtout) est influencée par le niveau économique des ménages. Pour le lait, l'essentiel de l'approvisionnement provient de l'importation et l'impact de la dévaluation monétaire de 1994 a fait passer cet aliment dans la gamme des produits de luxe pour le sahélien à revenu moyen. L'augmentation des prix des produits laitiers importés a réduit de manière drastique leur accessibilité par les ménages. A côté de cette importation, les quantités produites localement sont autoconsommées et vendues dans les zones rurales, mais restent non évaluées.

L'instabilité de la production animale au Sahel a de sérieux impacts sur une frange de la population que sont les éleveurs et les agro-pasteurs. L'impact des variations climatiques a plusieurs conséquences sur le bétail et l'éleveur. La diminution de la productivité à l'hectare du bétail provoque une baisse de la capacité économique de cette frange de la population. En plus du climat, une des causes de cette instabilité de la production est la faible couverture sanitaire des animaux. Plusieurs maladies contagieuses et parasitaires animales continuent à sévir au Sahel. Elles constituent une contrainte majeure au développement de l'élevage et ne favorisent pas l'introduction de races améliorées. L'élevage sahélien est aussi marqué par l'instabilité des prix des intrants notamment vétérinaires dont le Sahel est tributaire vis à vis de l'extérieur. Le secteur de production des vaccins et autres produits sanitaires est presque inexistant. S'agissant des ressources alimentaires provenant de l'agro-industrie, les quantités sont insuffisantes malgré les fortes demandes enregistrées ces dernières années dans les pays sahéliens exportateurs de bétail.

La formation des prix au producteur est mal connue compte tenu du caractère toujours "traditionnel" des systèmes de production. Les prix des produits sur les marchés, quoique libres, restent très élevés pour le revenu du Sahélien moyen. Les

prix de la viande dans certaines capitales sahéliennes sont presque identiques à ceux de certains pays importateurs. La qualité des produits animaux présentés sur les marchés laisse à désirer et aucun contrôle des denrées d'origine animale n'est mené à l'exception des contrôles effectués à l'abattage des animaux dans les abattoirs officiels. La formation en hygiène des denrées d'origine animale dans la chaîne de commercialisation de ces produits n'est pas non plus assurée. Cette qualité est souvent assurée dans les produits d'exportation au détriment des produits consommés localement.

En conclusion sur le concept de stabilité de la production animale, l'étude relève les possibilités de production de viande en quantité suffisante au Sahel. Une attention doit être cependant accordée à l'amélioration de la productivité des espèces tant au niveau viande que laitier. Cette amélioration doit surtout tenir compte de la diminution drastique des ressources naturelles et de la croissance démographique. Les mesures urgentes à prendre sont le maintien d'un niveau de production acceptable à long terme sans détériorer les autres ressources. Les pays sahéliens continueront pendant longtemps à dépendre de l'extérieur pour les besoins laitiers si aucun programme d'amélioration génétique n'est entrepris. Dans cette voie, il convient de souligner qu'au niveau mondial, la sélection génétique et les techniques d'alimentation ont beaucoup évolué pour permettre à certains pays sahéliens de s'y investir pour les générations futures.

Sur le concept d'accessibilité, les facteurs qui permettent d'assurer une croissance équilibrée sont la répartition équitable des revenus et les actions qui visent à réduire la pauvreté. Les actions à entreprendre ne devront pas être des freins à la production locale à l'image des dons alimentaires de produits laitiers faits par certains programmes.

### **c) la prise en compte de l'élevage dans les systèmes d'aide précoce**

Le caractère récurrent des problèmes alimentaires au Sahel depuis la sécheresse des années 1970 a eu pour conséquence la mise en place de programme de sécurité alimentaire. La concrétisation de ces programmes s'est faite

autour de systèmes d'information sur les productions agricoles dénommés « systèmes d'alerte précoce ». (S.A.P.)

### La place de l'élevage dans les systèmes d'alerte précoce actuels

L'élevage a été longtemps considéré dans les systèmes d'alerte précoce comme un facteur atténuateur des crises alimentaires. L'illustration de cette conception est la limitation de l'information sur les productions animales à l'analyse des termes de l'échange entre bétail et céréales au cours de la saison des pluies. Ceci s'explique par le fait que la plupart des systèmes d'alerte précoce ont eu comme objectif premier l'aide alimentaire et la détermination des quantités de céréales à importer.

Face au nouveau courant intervenu depuis les années 1980, la tendance a évolué par la prise en compte des aspects relatifs à l'environnement, notamment le problème de l'adéquation entre ressources naturelles et sécurité alimentaire. Là aussi, les S.A.P se sont intéressés uniquement à la productivité des parcours, les mouvements de bétail et dans une moindre mesure la santé animale sans une approche bien définie.

Une étude menée par le Projet Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles en 1996 a permis d'identifier les indicateurs d'élevage les plus fréquemment utilisés par les SAP alimentaires et nutritionnels en Afrique pour l'évaluation synthétique de la vulnérabilité. Les indicateurs les plus courants sont les suivants:

- la disponibilité de bétail
- la valeur de la production de bétail
- les mouvement des transhumants
- la sédentarisation
- l' offre et les prix sur les marchés à bétail
- la composition interspécifique sur les marchés
- la production laitière

Les informations fournies par les SAP sur ces paramètres restent très qualitatives. Celles qui portent sur les termes de l'échange font l'exception car elles proviennent de données d'enquête des systèmes d'information sur les marchés de céréales et à bétail.

Avec l'avènement des satellites d'observation météorologique, l'observation de surfaces étendues comme les parcours est devenue une réalité dans les pays du Sahel. Ces nouvelles technologies posent néanmoins d'énormes difficultés d'adaptation au contexte sahélien et de transfert dans les pays. Les indicateurs ou produits sont restés difficilement utilisables par les services nationaux. Quand ils sont directement produits par les pays eux-mêmes, l'interprétation est souvent abusive. Cette information sur les pâturages sahéliens dans les systèmes d'alerte précoce reste capitale pour les SAP et les services nationaux d'élevage surtout quand elle peut être complétée par des informations sur l'accessibilité des parcours du bétail et les ressources hydrauliques.

L'une des caractéristiques de l'information sur l'élevage pour l'alerte précoce réside dans l'absence de canevas d'information à l'image du domaine agricole. L'approche utilisée reste qualitative et l'utilité de cette information à l'état actuel ne paraît pas évidente. De nouvelles perspectives sont en cours au CILSS et dans d'autres régions d'Afrique pour faire de l'alerte précoce pastorale un système capable d'identifier les crises pour de meilleures stratégies de réponse au bénéfice du cheptel sahélien et des populations pastorales.

#### vers de nouvelles perspectives en matière d'alerte précoce pastorale

Le CILSS, dans ses nouvelles options, intègre le secteur pastoral dans tous les programmes politiques et opérationnels de sécurité alimentaire.

Sur le plan des programmes politiques, le secteur pastoral s'intègre dans toute la politique de sécurité alimentaire du CILSS à travers la fluidification des échanges des produits agricoles et agro-alimentaires, la promotion de la consommation des produits locaux, l'organisation des opérateurs économiques et des stratégies d'amélioration de la durabilité des systèmes de production.

Pour une sécurité alimentaire opérationnelle, le CILSS, à travers le Centre Régional Agrhymet effectue un suivi régulier des conditions agro-hydrométéorologiques des pays du CILSS. Ce suivi dans le domaine pastoral, est orienté vers l'élaboration d'indicateurs ayant trait à l'évolution de la végétation dans les pays du Sahel et l'établissement d'un bilan fourrager à la fin de la saison des pluies. L'un des inputs est l'imagerie satellitale NOAA-AVHRR et METEOSAT.

Dans le sens du renforcement des capacités des systèmes nationaux d'alerte précoce, ceux ci sont dotés de systèmes performants de traitement de l'information en temps réel mais aussi d'une importante base de données historiques sur l'élevage. Cette banque de données est utile dans l'élaboration d'indicateurs structurels pour le suivi des politiques et stratégies en matière de sécurité alimentaire. Un autre système est disponible au niveau des SAP et traite de l'information géographique basé sur les aspects biophysiques et socio-économiques. Ces informations permettent de définir les situations structurelles indispensables au suivi annuel des conditions de production agropastorale.

Parmi les aspects abordés au niveau régional, l'accent est en particulier mis sur les risques nutritionnels, notamment le potentiel de production fourragère des parcours. Les aspects liés à l'accès sont traités localement. Pour le risque structurel, le système intégré pour l'alerte précoce, part d'un modèle d'évaluation de la productivité des parcours. Ce modèle intègre les données de pluviosité annuelle, les données sur la texture des sols et les séries de données historiques sur la production de matière sèche. Il permet d'analyser le bilan fourrager sous différentes conditions de pluviosité au Sahel. Les indicateurs de capacité de charge sont une expression de ce niveau de risque nutritionnel. L'une des particularités du système, est qu'il permet de modéliser différentes conditions en l'occurrence la prédiction des situations extrêmes qui donnent une idée exacte de la durabilité de la production animale (Breman, 1991) . Sur le plan sanitaire, le système se base sur l'existence de foyers d'infection ou d'infestation ayant prévalu dans les zones suivies sur les 5 ou dix dernières années. Des variables environnementales sont analysées quand elles contribuent à l'existence de la maladie.

La détection du risque conjoncturel au cours de la campagne de suivi se base elle aussi sur les aspects nutritionnels et le développement des foyers d'infection. Sur le plan nutritionnel, elle repose sur le volume et la distribution des pluies au cours de la saison de croissance et son impact sur la production végétale au cours de la saison. Un indicateur, le front de végétation dérivé du NDVI est analysé tous les 10 jours pour compléter cette simulation de la saison de croissance sur l'ensemble du Sahel.

Le dernier point qu'intègre le système est la dimension triple de l'élevage. En effet, compte tenu de cette particularité qui fait de l'élevage le produit, le moyen et le capital de production (Hiernaux, 1997) contrairement à ce qui est observé dans les productions végétales, les conséquences du risque sont évaluées sur la production mais aussi sur l'éleveur.

Les autres aspects de risque non encore traités par le système, sont les risques économiques liés aux marchés et au potentiel de production du système. Ils sont par contre abordés au niveau national ou local à partir des données fournies par les systèmes d'information sur les marchés à bétail et céréales. Dans ce système, le rôle et les tâches dévolus à chaque niveau de décision sont clairement définis pour un système d'alerte efficace. L'accent est mis sur le niveau national car l'efficacité d'un tel système dépend aussi et fortement des informations à adjoindre où à croiser pour permettre aux décideurs et vulgarisateurs de prendre des décisions qui sont susceptibles d'apporter des changements significatifs dans le cycle de production. La substitution de ce maillon par le niveau régional ou international peut s'avérer très coûteuse pour des résultats insignifiants eu égard à la nature des problèmes à traiter.

L'autre aspect le plus important qui doit être pris en compte dans un tel système est la capacité d'évaluation de tout le mécanisme. Cette évaluation doit porter sur les résultats permettant aux communautés un meilleur bien être. Cette partie de l'évaluation, a été de tout temps négligée dans les systèmes d'alerte précoce. Dans le cas de l'élevage, comme souligné plus haut, la quantification des productions animales, et plus précisément alimentaires n'a jamais été finalisée. Des efforts sont faits par le CILSS pour définir la base nécessaire à cette évaluation notamment à travers le financement des enquêtes nationales sur les effectifs du



cheptel, sur les abattages domestiques, sur les paramètres zootechniques et sur les marchés à bétail. Malgré la pertinence de ces actions, l'utilisation des résultats pour l'établissement du bilan animalier à l'image du bilan céréalier n'a pas été possible dans les pays du Sahel à cause de la faible technicité du personnel des services de statistiques animales et leur retard dans la maîtrise des nouveaux outils informatiques, les techniques d'analyse et l'interprétation des données.

Les actions de développement de l'élevage au Sahel doivent être balisés sur des objectifs clairs de production et de satisfaction des besoins alimentaires en adéquation avec les ressources utilisées. Pour cela, les pays sahéliens doivent à l'avenir intégrer les aspects relatifs à cette information au niveau des plans et programmes en cours ou à venir. Ceci aura le mérite de permettre, à l'image du bilan céréalier, de mettre en place un cadre d'établissement du bilan animalier pour que les systèmes d'alerte précoce arrivent au bilan alimentaire.

### **Conclusion partielle**

Cette partie sur la problématique de l'élevage au Sahel et la sécurité alimentaire vise à présenter le contexte d'un tel travail qui doit nécessairement aboutir à des produits utiles pour les SAP et pour la promotion de l'élevage au Sahel. Il doit permettre de susciter davantage de débats sur la place qui revient à ce secteur dans la sécurité alimentaire. Il n'est pas du tout absurde de répéter que les actions de développement menées dans un pays n'ont de sens que si la pauvreté diminue, c'est à dire en termes alimentaires que la population concernée arrive à disposer de calories nécessaires pour son bien être. C'est ce à quoi, les actions dans le domaine des ressources animales doivent tendre, tant en produisant les calories nécessaires à l'alimentation humaine mais aussi en procurant le revenu nécessaire aux populations pour acquérir ces calories. Pour servir les générations futures, en plus de la sauvegarde environnementale, l'un des axes de développement de l'élevage au Sahel, reste l'amélioration alimentaire et génétique qui passe par une recherche et une application raisonnée des avancées technologiques existantes dans le domaine aussi bien en reproduction qu'en santé animale. Des efforts devront être faits pour l'amélioration des parcours notamment les jachères par des cultures fourragères à haute productivité (BULDGEN et al., 1997). Pour ce faire, en plus de l'investissement

dans la formation et la recherche, les nouvelles technologies de l'information peuvent jouer un rôle déterminant dans l'échange des données entre chercheurs, développeurs de pays sahéliens et du reste du monde.

Dans le domaine de l'information sur la sécurité alimentaire, l'élevage a été longtemps négligé à telle enseigne que les bilans générés par les services en charge de ce domaine au niveau des pays du Sahel se limitent à un bilan céréalier. Cet état de fait n'est le reflet que de l'absence de politique véritable de l'information au sein des structures de l'élevage du Sahel. Ces structures doivent s'orienter vers des opérations de collecte sur les productions annuelles en plus des statistiques actuelles fondées essentiellement sur la quantification des activités menées (nombre de vaccinations réalisées, nombre d'animaux inspectés). Ce n'est que dans ce contexte, que les avancées au niveau régional, notamment par le développement de méthodologies de suivi régional des aspects pastoraux, basés sur la puissance des systèmes d'information géographique dans la définition des zones à risque, pourront s'intégrer au mieux dans les systèmes nationaux d'alerte précoce. Toutefois, contrairement aux programmes d'information sur la production agricole au Sahel dont les coûts récurrents resteront difficiles à supporter par les budgets nationaux de pays sahéliens, et qui ont toujours été supportés en grande partie par l'assistance extérieure, la recherche d'un système d'information durable basée sur des méthodologies moins onéreuses ne constitue t-elle pas une autre forme de sécurité pour les Sahéliens ?

## **2. LA ZONE D'ETUDE**

Les travaux réalisés dans le cadre de ce travail ont pour échelle la nation et le terroir villageois. Ces deux échelles sont choisies en rapport avec les objectifs poursuivis qui visent à assurer la sécurité alimentaire des populations sahéniennes. Cette sécurité alimentaire ne va pas sans une meilleure gestion des ressources naturelles. Aussi, l'information sur les ressources naturelles doit tenir compte des centres de décision qui influencent cette gestion. Parmi ces centres, figurent la nation, la communauté rurale et ses démembrements que sont les familles, les ménages, les chefs d'exploitation. Dans le cas présent, la nation, le Niger ici, a été choisi car l'état est l'échelle administrative à laquelle la plupart des politiques qui influencent la gestion des ressources sont décidées. Ce niveau a besoin d'une information synthétique sur les ressources disponibles et leur évolution dans le temps pour la définition des stratégies et l'orientation des politiques. Le second niveau est celui des terroirs villageois représentés ici par les trois sites de recherche du Fakara où vivent les communautés rurales qui prennent la majorité des décisions de gestion des ressources naturelles. Une meilleure compréhension de ce niveau décisionnel est un gage de succès pour l'introduction d'innovations technologiques.

Cette deuxième partie présente donc succinctement le Niger afin de mieux situer le contexte géographique du travail. Elle présente ensuite les terroirs villageois du Fakara. Le canton du Fakara (région naturelle et/ou administrative située à l'est de Niamey) comprend les villages sur lesquels l'ILRI mène depuis 1994 des recherches sur l'élevage et plus particulièrement sur le transfert de fertilité des sols. Toutes les données de terrain proviennent de ces recherches.

### **2. 1 Présentation du Niger**

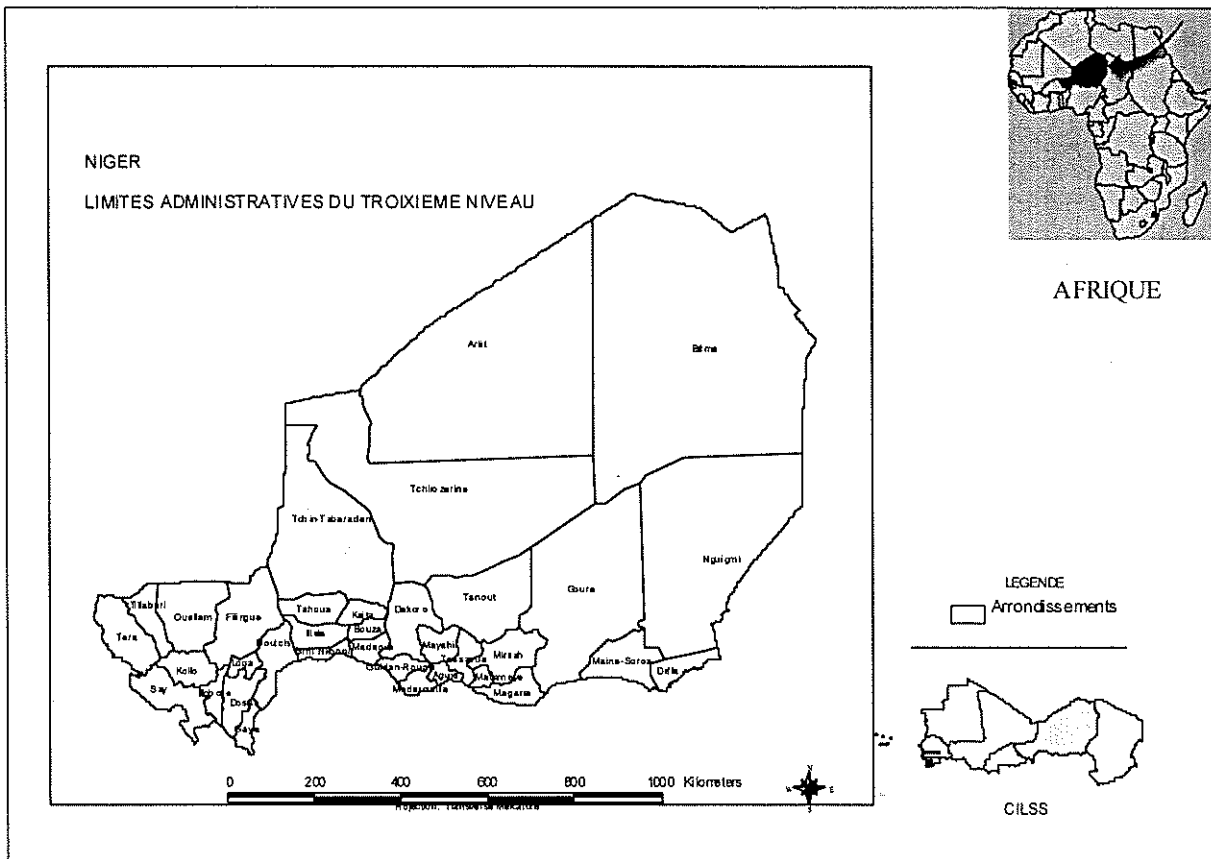
Le territoire du Niger se situe en latitude entre 11°37' et 23°33' Nord et en longitude entre 0°06' et 16° Est du méridien d'origine dans l'Afrique Occidentale (voir carte 2.1). Malgré sa grande superficie de l'ordre 1 189 000 km<sup>2</sup>, une grande partie reste désertique. L'agriculture pluviale reste confinée dans une zone agricole de 1300 km de long et de 300 km de large. Cette zone agricole est limitée au sud par la

frontière nigériane. Elle se rétrécit au fur et à mesure que l'on se dirige d'ouest en est.

Sur le plan topographique, le pays est une immense pénéplaine d'une altitude moyenne de 300 mètres. Il est marqué néanmoins par quelques hauteurs dont le plus élevé, l'Aïr, culmine au Mont Gréboun, à 2 310 mètres. Ces hauteurs sont complétées par quelques hauts plateaux, le Djado, le Manguéni et le Tchigai aux confins Nord-est, ainsi que le massif de l'Aïr (qui culmine à plus de 2000 mètres dans les monts Bagzane).

Le paysage voit alterner le plus souvent des bas plateaux gréseux, parfois couverts de sables, avec des dépressions non moins sableuses représentées par des cuvettes et des vallées anciennes (les dallols). Ainsi, à l'ouest, le plateau peu élevé est coupé par la plaine alluviale du fleuve NIGER, puis par les vallées des dallol Bosso et Maouri. Au centre se trouve l'Ader Douchi, vaste plateau de grès ferrugineux dépassant parfois 700m d'altitude.

**Carte 2.1. : Situation géographique du Niger**



**a) la démographie**

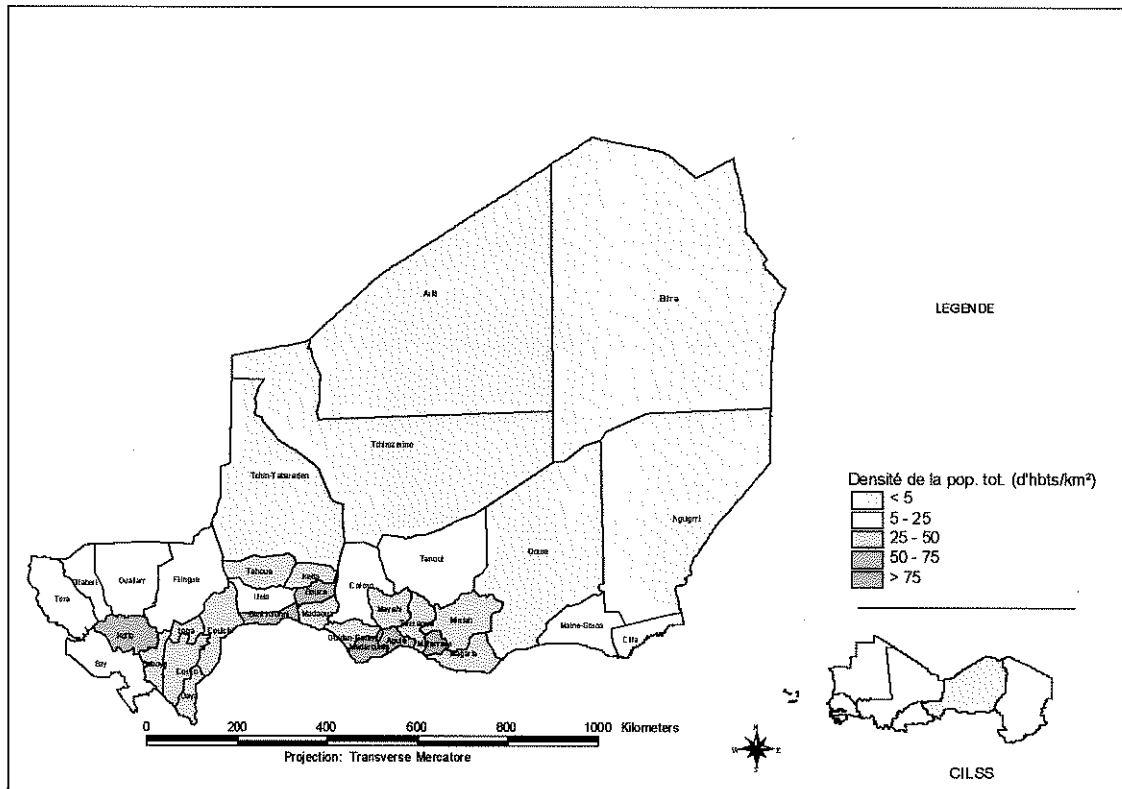
Le Niger comptait en Décembre 1999 une population 9 942 845 Habitants (Agrhyet, 2000). Sa croissance démographique de l'ordre de 3,45% (FAO, 1999) est l'un des plus élevés de la sous-région. La population est essentiellement rurale, de l'ordre de 82 %. Elle est concentrée au Sud de la ligne Ayorou-Tahoua-Tanout. La densité moyenne est de 6,5 hab./km<sup>2</sup> marquée par des pressions dans les arrondissements de Madarounfa et Matameye de 75 habitants / km<sup>2</sup> (Voir carte 2.2)

**b) le climat, la végétation et les ressources en eau**

Le climat

La succession de climat est régulée par le déplacement du front inter tropical (FIT) (cf. carte 2.3) . Le FIT est la ligne de convergence entre les vents alizés boréaux et les vents alizés austraux sur l'équateur thermique. Lorsque le FIT se

**Carte 2.2. : Densité de la population au Niger selon le recensement de 1988.**

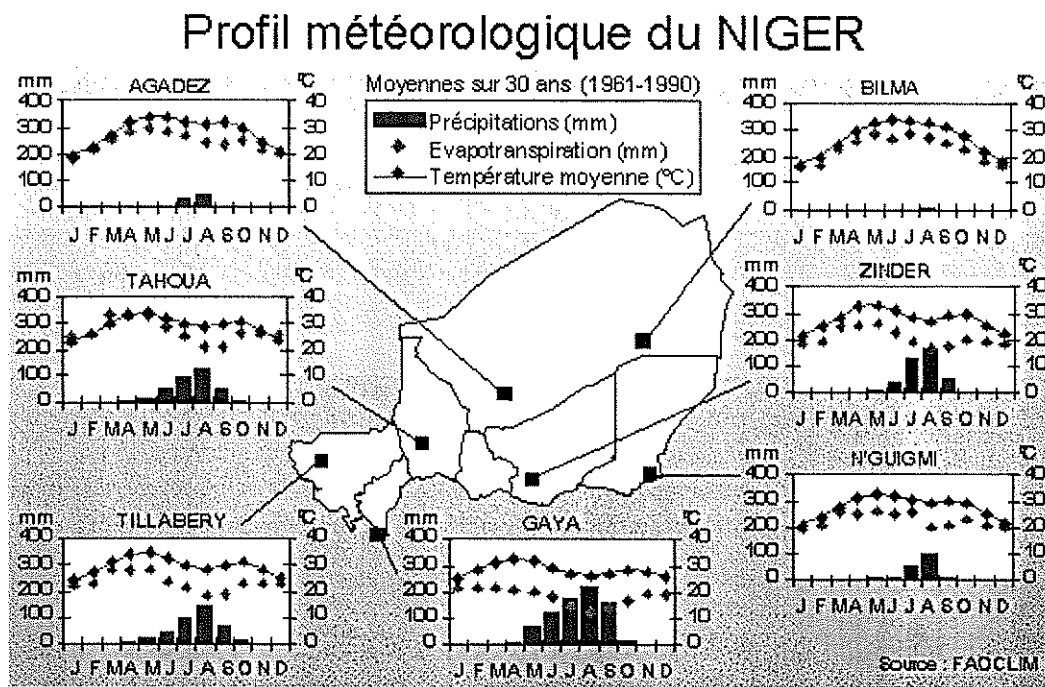


trouve dans sa position la plus septentrionale, les alizés de mousson amènent de l'air humide de l'océan. La saison des pluies qui y résulte ne dure en moyenne que 3 à 4 mois, de juin à septembre. Le reste de l'année, l'alizé continental, nommé harmattan, amène l'air chaud et sec du désert. Au Niger, Le Houérou distingue 5 sous climats et 6 zones écologiques selon la pluviosité et la durée de la saison sèche. La classification de Koppen distingue la zone des climats tropicaux avec le type Aw, le climat tropical alterné avec la savane et la zone des climats secs avec la zone de sécheresse hivernale, tropicale.

L'utilisation du quotient pluviométrique d'Emberger pour la classification climatique donne des valeurs très élevées. Pour la région de Niamey, il est de l'ordre de 70. Cette valeur est supérieure au coefficient des zones semi-arides qui se situent entre 35 et 65. La pluviosité annuelle sur la ville de Niamey entre la période 1967-1997 constitue une série statistiquement homogène (coefficient de variation inférieur à 21%). Au cours de la saison chaude, lors des mois d'avril à mai,

la température moyenne journalière est de 33.4°. Le thermomètre peut dépasser 45° provoquant de très fortes évaporation ( cf graphique 2.1).

**Graphique 2.1 Synthèse climatique du Niger ( source : FAO, GIEWS)**



**Carte 2.3 : Position du FIT en Juillet 2000 (source :Agrhymet)**

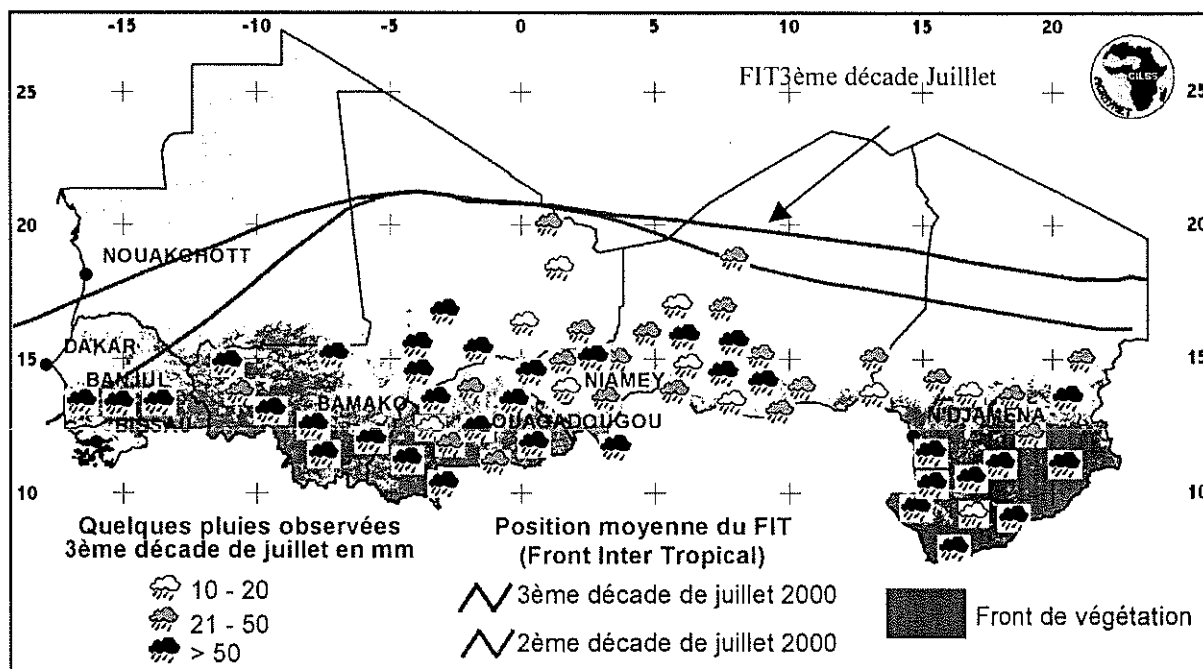


Tableau 2.1 : Les sous climats du Niger

Zones	Sous - Climats	Zones écologiques	Pluviosité (mm)	Durée SP mois
7	Desertique	Saharo sindienne	< 100	1
6b	Aride	Saharo-Sahélienne	100-200	1-3
6°	Aride	Sahélienne	200-400	2-4
5	Semi-aride	Soudano-Sahélienne	400-600	3-5
4	Sub Humide	Nord Soudanienne	600-800	4-6
3	Humide	Sud Soudanienne	800-1000	5-7

Source : Le Houérou ,1980

Les caractéristiques de la pluviosité dans cette région du Sahel sont surtout leur concentration en juillet et Août ( 50% du cumul annuel) et la très forte variabilité aux petites échelles de temps. Le coefficient de variabilité inter annuel entre les mois est supérieur à 30 % entre 1967 et 1997.

Afin de simplifier les classifications climatiques existantes, on peut retenir 3 zones climatiques au Niger :

- La zone saharienne située au Nord avec des précipitations de 0 à 150mm . Cette région se caractérise par le nomadisme agricole et pastorale dans les oasis et les vallées des massifs montagneux.
- La zone Nord sahélienne avec une pluviosité comprise entre 150 mm et 600 mm C'est la zone de l'élevage extensif et de la culture de mil. Entre la zone agricole et d'élevage, existe une zone de transition ou les deux activités sont intimement liées.
- La zone sud sahélienne se situe dans quelques régions avec des cours d'eau permanents ou semis permanents.



## la végétation

Dans la zone saharienne, la végétation est dominée par les steppes et une végétation ligneuse disposée en mode diffus, et des graminées pérennes. Cette population végétale compte aussi les éphémères qui sont des annuelles à cycle très court.

Dans la zone nord sahélienne, dominent les arbres et arbustes épineux dans une formation très ouverte et des graminées annuelles. Cette zone demeure la région de prédilection de l'élevage. Dans les dépressions de ces zones, la végétation présente quelques similitudes avec la zone soudanienne.

Dans la zone sud-sahélienne, c'est la savane à combrétacées à dominance d'arbuste mésophylles caducifoliées de la famille des combrétacées et des éléments sahéliens et soudaniens qui montrent que la limite n'est pas stricte du point de vue de la végétation. La végétation est de type savane arborée et arbustive, et le tapis graminéen est constitué d'annuelles et de vivaces dans les dépressions humides.

La savane nord soudanienne est caractérisée par un recouvrement arboré et arbustif de l'ordre de 20 à 25% avec des espèces ligneuses mésophylles. Le tapis graminéen constitué de vivaces est très important.

Sur les plateaux, une végétation caractéristique y est présente : c'est la brousse tigrée. La brousse tigrée est une organisation végétale matérialisée sur le sol par une alternance d'arcs végétalisés et de bandes nues (Seghieri et al., 1994). Elle est essentiellement dominée par les annuelles comme *Microchloa indica* (67%) et *Cyanotis lanata* (21%) et des combrétacées dans le cas de certains sites. La population végétale peut varier suivant les isohyètes pluviométriques (Hiernaux et al., 1999).

## Les ressources en eau

Le principal cours d'eau permanent qui traverse le pays est le fleuve Niger sur une longueur de 550 km. Les volumes écoulés varient selon des cycles de sécheresse entre 23 et 32 km<sup>3</sup>/an. D'importantes ressources souterraines en eau existent au Niger mais comme les eaux de surface, elles sont très peu utilisées et peu exploitées pour l'agriculture.

### **c) les sols du Niger**

Les sols ont été essentiellement marqués par la période du quaternaire. C'est le cas des cuirasses à Niamey qui remontent au quaternaire moyen ou ancien soit 500 000 ans (Gavaud et al., 1964). Sur la base de la carte des sols du Niger au 1/500 000 publié par l'ORSTOM, on distingue trois grands types de sols au Niger :

- Les sols dérivant de matériaux sableux d'origine éolienne : Ils sont organisés en cordons avec une alternance de dunes à sols sableux rubéfiés et d'inter dunes à sols argileux. Ils se caractérisent par leur faible teneur en colloïdes et des déficiences minérales.
- Les sols à couverture riches en argiles qui se sont développés sur les glacis dans les zones ayant une pluviosité inférieure à 800 mm.
- Les sols à couverture pédologique ferrugineuse issus du paléoclimat quaternaire. Ils couvrent les zones granitiques ou schistiques. Ils dérivent des glacis et des plateaux cuirassés. Leur profondeur est faible avec une macro porosité importante. Ces sols sont très peu profonds.

### **d) Les activités de production agro-pastorale**

Au Niger, dans la zone dite agricole, les systèmes de production sont caractérisés par une agriculture mixte. Les cultures vivrières sont le mil en association avec le niébé et le sorgho dans une moindre mesure. Les exploitations agricoles sont de type familial et traditionnel. En dehors des cultures vivrières, la

culture du niébé est très développée. Sur le plan pastoral, l'élevage reste de type extensif marqué par la transhumance et la semi-sédentarisation.

Dans la zone dite pastorale, les systèmes de production pastorale pur et nomade côtoient un système agro-pastoral. Dans le désert, existe le système de production oasien basé sur l'existence d'une agriculture et d'un élevage lié à la présence des oasis.

#### l'agriculture au Niger (cf. tableau 2.2 et 2.3)

Les superficies cultivées sont en croissance continue et l'occupation des sols atteint les sols incultes. L'une des causes de l'extension des zones agricoles est la croissance démographique. Des besoins de sécurité amènent les agriculteurs à augmenter les surfaces cultivables. Cette tendance (cf. graphique 2.2) ne peut se poursuivre à cause de la pauvreté des sols. Plusieurs travaux montrent en effet que cette zone de l'Afrique ne pourra éviter cette dégradation des ressources qu'avec une amélioration des techniques culturales et des jachères par introduction de cultures fourragères temporaires comme *Andropogon gayanus var. bisquamulatus*. (Mohamed et al., 1995 ; Buldgen et al, 1997) surtout quand l'exportation de matière organique dans la zone excède 49 kg /an /ha. (Stangel, 1995).

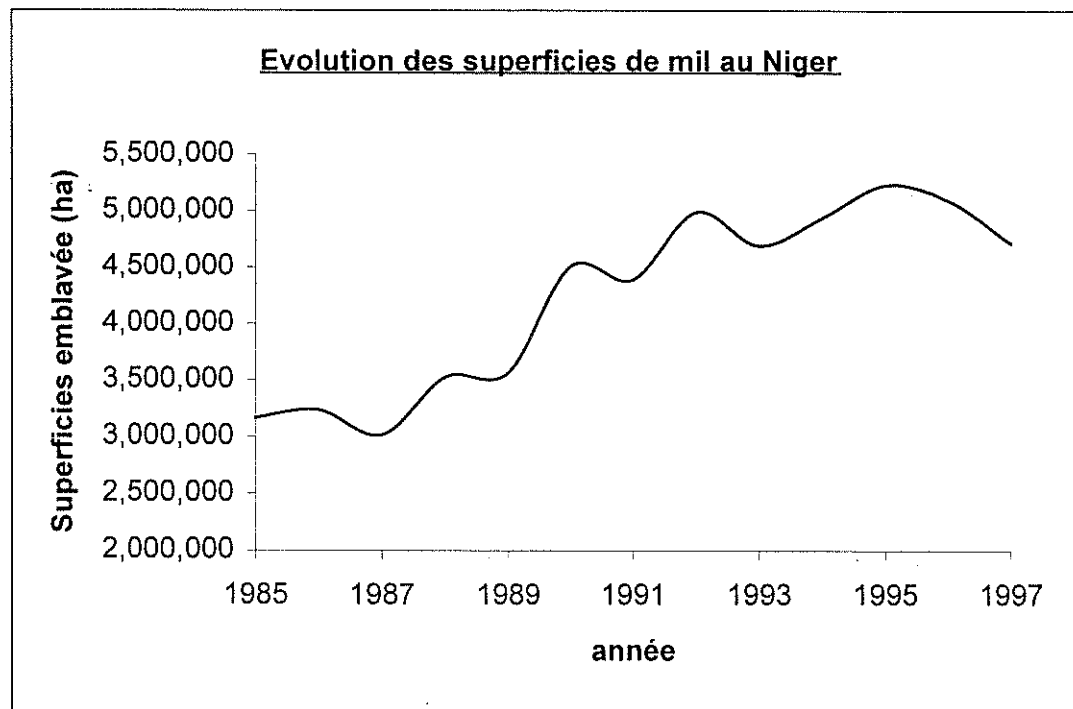
**Tableau 2.2: Principales Productions Agricoles au Niger : Production (Tonnes)**

Année	MIL	NIEBE	SORGHO	ARACHIDE	MAIS
1985	1,449,884	116,668	329,220	8,478	3,64
1986	1,383,395	292,935	360,164	54,549	6,25
1987	996,930	208,769	365,847	39,302	7,77
1988	1,766,316	301,548	560,188	11,087	5,54
1989	1,332,728	320,423	421,880	23,296	1,19
1990	1,092,478	219,542	278,130	17,533	1,75
1991	1,832,789	434,014	463,992	39,191	No data
1992	1,787,054	402,308	383,742	57,120	97
1993	1,474,711	167,440	288,692	20,138	7
1994	1,972,644	379,798	396,578	67,433	1,74
1995	1,769,324	184,105	264,922	111,094	1,58
1996	1,758,005	296,284	408,256	196,230	3,62
1997	1,351,869	195,524	289,672	88,425	3,00

**Tableau 2.3 :Superficies des principales cultures (ha)**

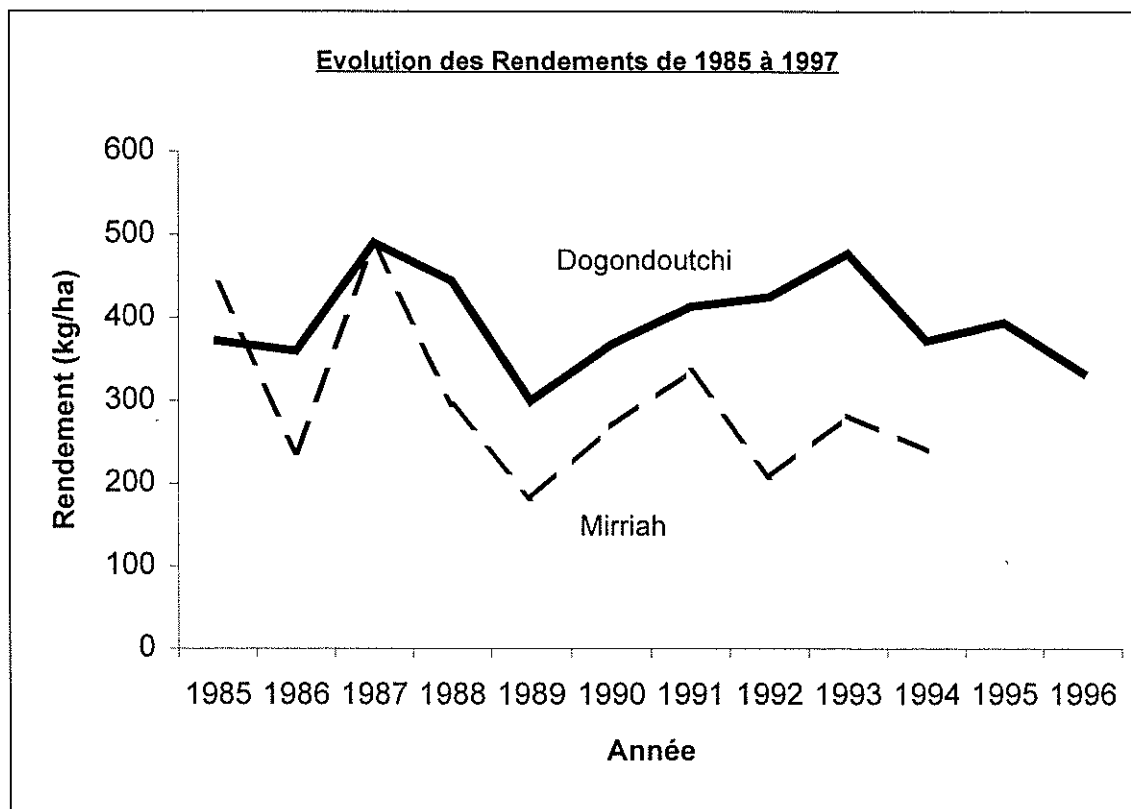
Année	MIL	NIEBE	SORGHO	ARACHIDE	MAIS
1985	3,168,705	1,573,322	1,142,226	29,760	8,180
1986	3,239,487	1,590,541	1,109,110	118,223	9,435
1987	3,016,723	1,790,809	1,342,306	158,244	14,034
1988	3,525,947	1,924,472	1,469,821	78,256	10,017
1989	3,565,716	2,208,687	1,587,410	57,495	1,782
1990	4,508,577	2,579,413	2,238,413	62,746	5,600
1991	4,389,730	2,642,516	2,174,892	104,840	-999
1992	4,988,796	3,899,398	2,530,518	175,180	1,485
1993	4,690,875	3,278,710	2,238,828	108,399	499
1994	4,934,039	2,976,699	2,015,893	153,469	2,401
1995	5,229,451	3,439,111	1,934,925	269,376	5,768
1996	5,091,962	3,043,968	2,115,355	416,055	22,957
1997	4,718,253	3,455,655	2,048,008	293,280	2,920

**Graphique 2.2**



A l'inverse des superficies, les rendements agricoles n'évoluent guère pour les cultures. Les rendements de la culture principale, le mil, stagnent à un niveau moyen national de 400 à 500 kg /ha . Le graphique 2.3 illustre cette stagnation des rendements des arrondissements de Dogondoutchi et de Mirriah, les 2 plus grands producteurs du Niger.

**Graphique 2.3**



les systèmes pastoraux

Les tendances actuelles de l'environnement biophysique, économique et sociale ont considérablement modifié les structures pastorales au Sahel. Plusieurs types de systèmes pastoraux s'y retrouvent, allant de l'élevage pur nomade au système sédentaire.

Trois grands types d'élevage existent au Niger avec des variantes: le pastoral pur ou nomade, le pastoral transhumant et l'agropastoral. Ce dernier comprend aussi le système d'élevage sédentaire des zones agricoles. L'élevage urbain et péri-urbain se sont développés ces dernières années autour des grandes villes. Ils assurent l'approvisionnement en produits laitiers des centres urbains. La plupart de ces systèmes comprennent des sous-systèmes suivant les critères de classification retenus. Ce sont :

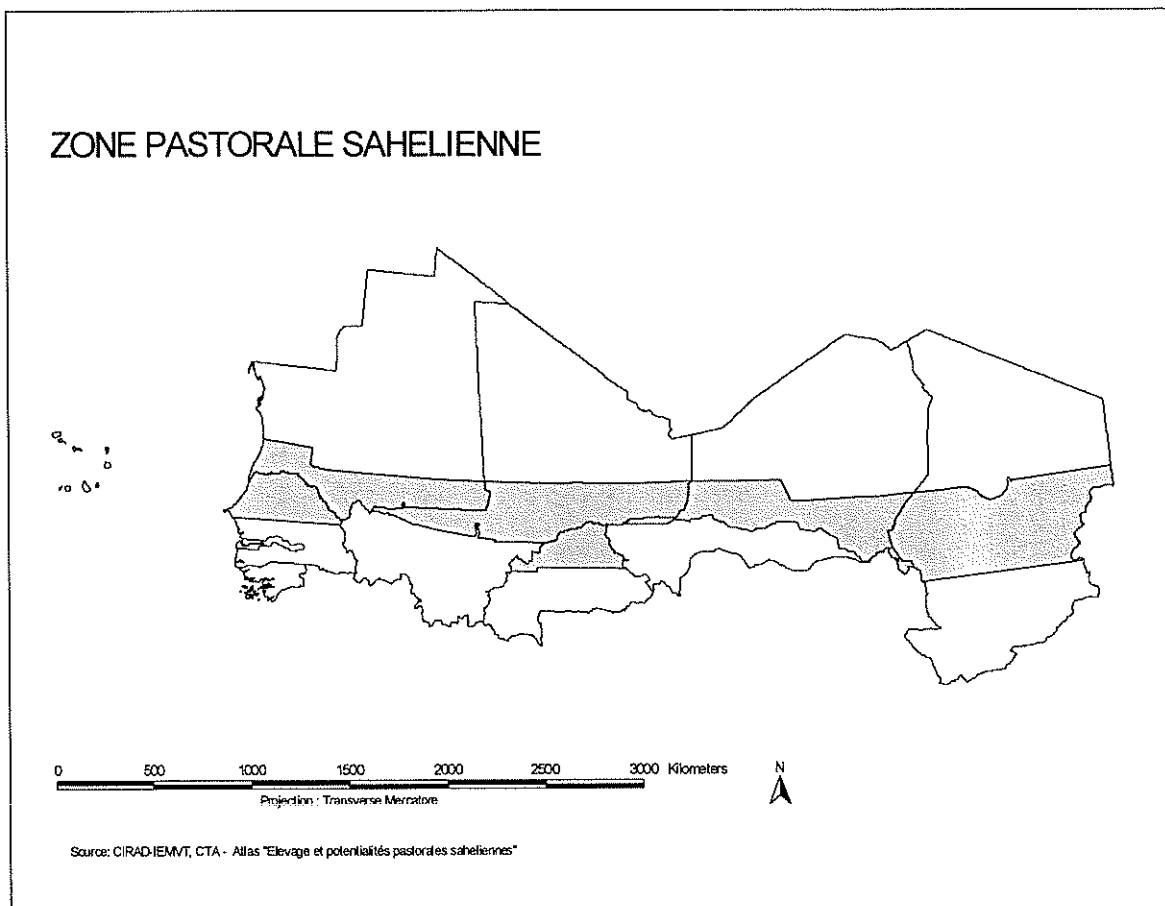
- le système oasien propre à la zone saharienne: système complexe associant production dattière, agriculture irriguée de subsistance, petit élevage sédentaire et élevage camélin transhumant,
- le système d'élevage nomade est pratiqué dans les zones septentrionales du Sahel et est dominé principalement par la présence de dromadaires et de caprins et aussi de bovins chez les peuhl Woodabe, avec une mobilité accrue . Dans ce groupe, on distingue selon les régions, le nomadisme apériodique caractérisé par un circuit non ciblé, le nomadisme à déplacement périodique et les semi-nomades avec déplacement d'un habitat fixe à un autre,
- le système d'élevage transhumant est localisé dans les zones semi-arides et il est associé à l'agriculture pluviale. Certains transhumants ont leur terroir d'attache en zone soudanienne (peuls de Sokoto). Ce système se caractérise essentiellement par des déplacements saisonniers sur longue distance ayant un même point de départ et d'arrivée avec ou sans la famille. Les destinations peuvent aller au delà des frontières nationales,
- le système d'élevage agropastoral se caractérise par des déplacements saisonniers de faible amplitude liés aux pratiques agricoles et il tend à devenir sédentaire dans les zones sub-humides. Ce système comprend aussi l'élevage pratiqué dans les zones fluviatiles et irriguées. En termes de flux, ce système offre une plus grande adéquation dans les échanges d'éléments organiques et minéraux entre le secteur élevage et agricole,

Quant à la répartition du cheptel dans la zone semi-aride tel que défini par le Houerou, 30% du bétail considéré est élevé dans les systèmes agro-pastoraux et 70% dans les systèmes pastoraux associés aux cultures pluviales. Par contre, dans les zones arides, 50% des bovins et 70% des petits ruminants sont élevés dans le système pastoral pur et le reste dans une association avec le système de culture pluviale de mil. Ces proportions peuvent varier selon les systèmes.

Dans la détermination des potentialités pastorales, l'IEMVT<sup>1</sup> a travaillé sur une bande sahéenne appelé zones pastorales (IEMVT,1988). Cette cartographie est très utile pour la compréhension des systèmes pastoraux et leur dynamique. Elle est restée dans certaines situations caduques au vu de la répartition actuelle du cheptel. Elle représente néanmoins les zones où la problématique pastorale est très cruciale sur le plan des ressources alimentaires. (cf. carte 2.4.)

Dans les différents systèmes apparaît l'élevage de type péri urbain qu'il ne convient pas de distinguer comme un autre système d'élevage car les pratiques de conduite sont celles de la région. Seule la destination des produits et la gestion en diffère.

**Carte 2.4 : Zone dite pastorale au Sahel**



<sup>1</sup> Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire Tropicale, France actuellement CIRAD-EMVT.

## **2.2. Les terroirs du Fakara**

### **a) présentation de la zone**

Dans le domaine de la gestion des ressources naturelles, la notion de terroir reste toute fois variée. Nous reprenons ici celles/ donnée par Loireau (1993) qui définit le terroir comme un espace rural géré par une communauté qui affirme y exercer des droits d'exploitation et d'occupation dans un cadre socio-économique et culturel défini. Cette définition marque tout le contenu sociologique, juridique et socio-économique. Dans les zones sahéliennes, le terroir se confond au village et à l'espace géré par ses habitants.

Les terroirs du FAKARA se situent en zone sahélienne près de la ville de Niamey sur un degré carré : 13-14° N , 2-3° E. Le choix de ces terroirs, en plus du fait qu'ils caractérisent une grande bande zonale du Sahel (Hoepffner et al., 1992), est justifié par l'existence d'une grande homogénéité dans les facteurs bio-physiques et de grandes disparités dans les pratiques paysannes. Comme partout dans le pays, l'économie de ces terroirs est basée essentiellement sur l'agriculture pluviale avec le mil comme culture principale et l'élevage extensif de bovins et de petits ruminants. Ces différentes spéculations ne bénéficient pas d'un climat favorable ni de sols de bonne qualité pour assurer de bonnes productions. Le climat de type sahélien se caractérise par une variabilité spatio-temporelle importante. Le gradient pluviométrique de ces terroirs est de 1 mm par km, avec une différence de pluviosité de 100 mm au sud par rapport au nord. La pluviosité annuelle varie de 200 à 800 mm (Shivakumar, 1993)

### **b) le relief, les sols et la végétation**

#### le relief

Le relief est très peu marqué avec un dénivelé maximum de 100 m sur la surface totale. La structure géologique est de type continental terminal formée de grès des dépôts du miocène. Il couvre le complexe cristallin du précambrien. Les zones du continental terminal sont localement couvertes avec un dépôt sableux du



quaternaire qui forme les dunes orientées ENE, OSO dans la partie nord et nord ouest

### les sols et leur occupation

La carte des sols a été établie sur 500 km<sup>2</sup> à partir de photographies aériennes. L'occupation des sols a été aussi cartographiée de 1994 à 1996 avec une caméra 24 x 36 mm à 1200 m d'altitude.

Les caractéristiques des sols sont du type luvic arenosols (Hiernaux, 2000). Les textures associées à ces types de sols sont sablonneux à limoneux de 93 % à 5.7 % respectivement pour la couche de surface et 88.6% et 8.4 % pour une profondeur de 1 mètre. La matière organique est de 0.30% dans les profils de sols.

La région du Fakara ( cf carte 2.5) est une région naturelle localisée entre la vallée du fleuve Niger à l'Ouest et à l'est le Dallol Bosso. Cette vallée fossile des formes tributaires du Niger s'étend de l'Ouest du Niger au Sud Est du Mali.

Le matériel initial des sols actuels provient des modifications intervenues au Pleistocène donnant aux sols du Fakara leur caractère polygénique (Hiernaux, 2000). Les sols du Fakara, malgré leur substrat uniforme ont des aptitudes agricoles différentes. (Hiernaux, 2000),

### **Géomorphologie**

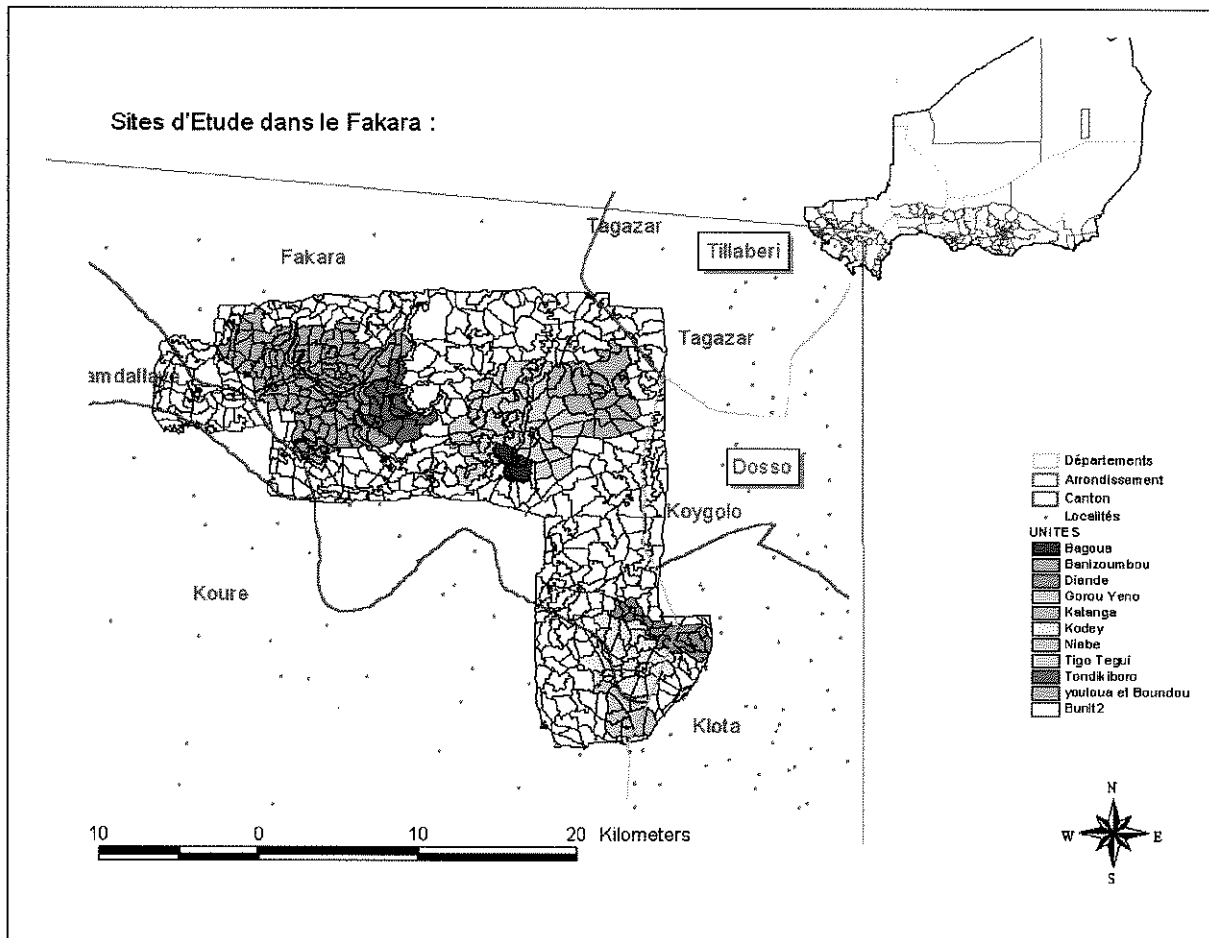
Sur le plan de la géomorphologie, on peut distinguer 4 grand faciès, les zones d'habitations et les parcs :

- les plateaux cuirassés

Les plateaux de la région sont de vastes plateaux tertiaires, reposant sur un soubassement cristallin très profond qui n'affleure qu'en bordure du fleuve en système granitique et gréseux assez tourmenté. Ces plateaux sont formés de terrains silico-argileux ayant une carapace ferrugineuse de latérite de 0.5 à 4 mètres

d'épaisseur. Ces plateaux s'élèvent en pente douce vers le Nord. Ce sont des cuirasses ferrugineuses qui abritent la brousse tigrée. Les pentes ne dépassent guère 0.6 pour mille . La faiblesse de ces pentes contribuent à la dynamique de la végétation. Sur ces plateaux, il existe quelques ensablements qui sont réservés à la culture. Après les plateaux, on rencontre le talus avec une pente forte de l'ordre de 35% composé par des gravillons sombres.

**Carte 2.5 : Le Fakara**



- les jupes sableuses et les glacis

Ils sont situés à la base des plateaux et sont constitués de sables rouges . Ce sont des dépôts de l'erg ancien datant de l'Ogolien . Deux zones existent, la zone en amont ou jupe sableuse (pente de 5%) et une zone en aval (glacis) avec une pente

faible qui se termine par un épandage large de 40 m. Ils sont creusés de ravines dus à l'écoulement des eaux des plateaux. Les glacis se caractérisent par leur couverture sableuse dominée par la végétation ligneuse parallèle à l'axe du Kori principal.

- les bas fonds

C'est le plus bas niveau de la toposéquence. La texture est sableuse à argilo-sableuse avec des sables plus clairs et une pente faible. Sur les bas fonds on distingue les replats et contre pentes très dégradés.

- les cordons dunaires

C'est une macro structure superposée aux ensembles précédents et très cultivés.

### ***L'occupation des sols***

Sur la base des photographies aériennes des 3 sites, l'occupation de l'espace est de type auréolaire avec une première zone autour du village totalement cultivée et constituée de champs dits de « case » qui sont plus grands que ceux rencontrés en zone soudanienne; le second anneau est occupé par les champs, les jachères, les pistes à bétail ou Gourtol qui font l'objet d'occupation par les cultures (cf. photographie 1, 2,3,4).

Sur le plan du paysage ou de l'occupation du sol, la zone comprend trois types : Les zones cultivées en mil, les jachères, dans les zones de savane et sur les sols sablonneux des bords de vallée, la brousse tigrée qui sont des bois ouverts sur les sols latéritiques et les plateaux.

Dans les zones cultivées, le mil (*Pennisetum glaucum*) est la principale culture comme dans le reste du pays. Il est surtout cultivé sur les sols sableux à la lisière des vallées. Il est aussi cultivé en association avec le haricot (*Vigna unguiculata*).

Les jachères sont des anciens champs de mil laissés au repos durant une période donnée. Elles se caractérisent par une mono-dominance floristique dans la strate ligneuse par *Guiera senegalensis* qui couvrent 10 à 15% de la superficie et une grande variété d'herbacées . Les sols nus représentent 15% des surfaces. Ces jachères sont utilisées pour les parcours du bétail mais aussi pour le bois.

La brousse tigrée existe surtout sur les plateaux latéritiques. Ce sont des fourrés ouverts de 10 à 30 m de large sur 100 à 300 m de long. Ils sont aussi utilisés pour les parcours et le bois mais posent d'énormes difficultés de gestion (Compere, 1994).

Ces unités d'occupation de sol sont très fluctuantes d'une année à l'autre.

### **c) démographie et activité des hommes**

Le canton de Fakara compte en 1999, 24870 habitants (AP3A, 2000). Cette région est surtout peuplée de Zarma, de peulh et de Haoussa. L'agriculture pratiquée par ses populations se caractérise par un faible développement des techniques ( utilisation des brûlis et de la jachère, utilisation de l'Her<sup>2</sup>) et une stagnation des rendements. Les techniques culturales sont limitées à la jachère et à l'apport de fumier dans les champs. Ceci explique en grande partie la variabilité des rendements entre exploitation d'une même zone selon le temps de jachère et la pratique ou non du parcage. L'extensification des cultures peut être aussi considérée comme une technique ou une stratégie de limitation des risques au vu des variations climatiques locales très importantes (De Rouw, 1997). Dans la zone d'étude, il a été observé une augmentation entre 1950 et 1990 de l'occupation des terres de l'ordre de 20% à 70% (Loireau et al., 1994). Ainsi les stratégies actuelles visent à diminuer le nombre d'années de jachères et à augmenter les superficies. Les techniques de fumure utilisées qui vont du coralling au ramassage des fèces pour les champs donnent des rendements très élevés. Des travaux de recherche en cours montrent que les apports de fumier par parcage ont des effets résiduels assez intéressants. Selon Ambouta et al. (1998), une enquête menée auprès des paysans montre que la

---

<sup>2</sup> outil de travail dans les sols sableux en forme de patte d'oie

rémanence est très variable selon l'origine du fumier avec 7 ans pour les déjections de petits ruminants, 3 ans pour les bovins et 1 an pour les équins.

Malgré ces pratiques, les systèmes de production se caractérisent par une inadéquation entre la baisse de la fertilité, la diminution du temps de jachère et l'augmentation des besoins (Michel, 1998).

#### **d) le système d'information environnemental sur les terroirs du FAKARA**

Le système d'information sur les terroirs du FAKARA, mis en place par l'ILRI dans le cadre de l'étude sur le transfert de fertilité dans les systèmes mixtes de production a pour objectif de permettre l'évaluation de l'importance de l'élevage dans le maintien de la fertilité des sols. Ce système se fonde sur une base empirique de délimitation des aires géographiques qui vont servir à établir les bilans paysagers et autres bilans de flux d'éléments fertilisants (budgeting zones). Ces unités géographiques sont destinées à faciliter la modélisation spatiale nécessaire à l'évaluation des performances des systèmes de production à différents échelles (niveau village et régional ) sous différents modes de gestion de l'espace, de culture et d'élevage. Les objectifs poursuivis par ce SIG sont d'assurer la création de couvertures géographiques qui permettent une meilleure compréhension de la dynamique de l'occupation de l'espace sur plusieurs années et d'estimer les flux d'éléments nutritifs à différents échelles.

La constitution des couches d'information géographique s'est basée sur les données historiques existantes de la zone et sur les données récentes issues de la photographie aérienne et de la prise de points GPS sur les sites. L'une des caractéristiques de ces sites est leur similarité sur le plan géomorphologique, de la végétation et du climat . Ils diffèrent entre eux dans l'occupation des terres et dans les pratiques d'élevage. La proportion de terres cultivées varie de 35% sur les sites centrés autour de Banizoumbou, 45% à Tigo et 65% à Kodey (Hiernaux, 2000)

Le système d'information environnemental est un outil de gestion, d'analyse et de modélisation des informations sur l'environnement. Il permet de mettre en évidence la dimension spatiale et temporelle des facteurs qui influencent la gestion

des ressources au niveau local ou au niveau régional. Dans un tel système on distingue les couches de base et les couches élaborées (sur la base de modèles dans certains cas) par suite de l'analyse des informations existantes.

### La carte des unités géographiques

Les unités géographiques sont des unités de compte pour le suivi-évaluation des ressources et de leur utilisation. Ces unités ont été délimitées par l'ILRI sur la base d'éléments connus sur le terrain. Une attention particulière a été accordée à l'homogénéité dans l'utilisation de la terre et de la géomorphologie dans les unités, de même que la présence de l'élevage. C'est une unité fonctionnelle qui permet de résoudre le problème de la variabilité spatio-temporelle des occupations de sols à partir d'une approche globale par unités paysagères majeures (d'Herbes, 1995). Dans ces unités, il est possible de définir une proportion d'unité d'occupation de l'espace. Cette notion diffère de celle de terroir et d'unité de gestion. L'unité de gestion est le terme utilisé pour les unités territoriales gérées par chacun des ménages.

La photographie aérienne (cf. carte 2.6) qui figure ci-dessous montre en partie les unités géographiques du site de Kodey superposé à la photographie aérienne de 1996 qui permet de distinguer les unités d'occupation des sols. On se rend compte de l'indépendance entre utilisation des terres et les unités géographiques. Sur l'ensemble de la zone, il y a 694 unités géographiques réparties sur les 3 sites dont les aires sont très variables. L'ILRI donne la dénomination site aux 3 villages sur lesquels sont concentrées les recherches sur le transfert de fertilité, Banizoumbou, Kodey, Tchigo Tegui. Autour de ces 3 villages, existent plusieurs autres villages dont les terres sont subdivisées en unités géographiques pour les besoins de la recherche.



Carte 2.6 : Les Unités géographiques et la photographie aérienne de 1996 du Site de Kodey

### les cartes d'occupation des sols

Trois principales utilisations des sols existent dans le Fakara et se résument aux jachères, aux champs et aux sols incultes. Une distinction est faite entre les champs non fumés et fumés. Dans la caractérisation de la zone, Hiernaux, (2000) distingue ces 3 grandes composantes et les pratiques paysannes. Pour les jachères, il distingue les jachères utilisées après une première culture, des jachères avec plusieurs cultures après le repos, des sols appauvris par suite de culture sur plusieurs années et les sols riches non cultivés.

Dans le cas des champs fumés, il distingue la fumure des champs de proximité, la fumure par corralling . Pour les parcours, il y a les surfaces fumées par corralling nocturne, les pistes à bétail, les mares et les puits. Comme souligné dans le chapitre précédent, la variabilité de ces types d'occupation est presque annuelle.

Dan le cadre de son programme d'écologie végétale, le programme HAPEX a travaillé sur la cartographie d'occupation des sols de 1950, 1975 et 1992. L'occupation des sols des années 1994, 1995, 1996 et 1997 a été cartographié par

l'ILRI sur la base de la photographie aérienne avec une caméra simple de 24 x 36mm monté à bord d'un aéroplane à 1200 m d'altitude (Hiernaux, 2000) (cf. photographie 5, page 47) et une vérification systématique au sol en 1994, 1996, 1997, et 1998.

L'examen des différentes occupations de sols confirme l'extensification des superficies cultivées au Sahel. Les superficies des cultures sont passées de 20,5% entre 1950 et 1975 à 33,9% entre 1975 et 1992 (Loireau et al., 1994) et selon les couches disponibles, le pourcentage de sols cultivés est passé de 32.8 % à 39,4% entre 1992 et 1994 sans les friches (cf. graphique 2.4). Cette augmentation comme souligné se fait au détriment des jachères. Cependant, entre 1992 et 1994, le taux de champs fumés augmente sensiblement de 6% à 9% alors que les sols nus stagnent.

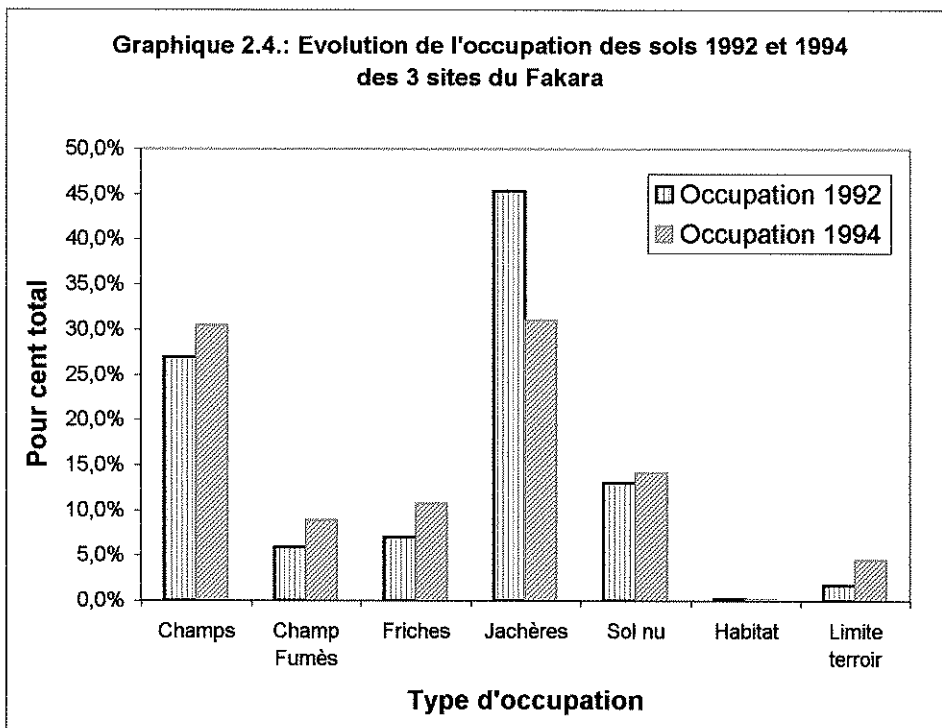
Au Sahel, eu égard à la variabilité climatique sur le plan spatial et temporel, les différentes unités peuvent varier d'une année à l'autre. C'est le cas du site de Kodey (carte 2.7) où une analyse des couches d'occupation des sols entre 1992 et 1996 montre une diminution des superficies cultivées en 1996 inférieures à celles de 1992 et une augmentation des sols nus et des jachères. (cf. tableau 2.4)

**Tableau 2.4: Occupation des sols du site de Kodey de 1992 à 1996 en %**

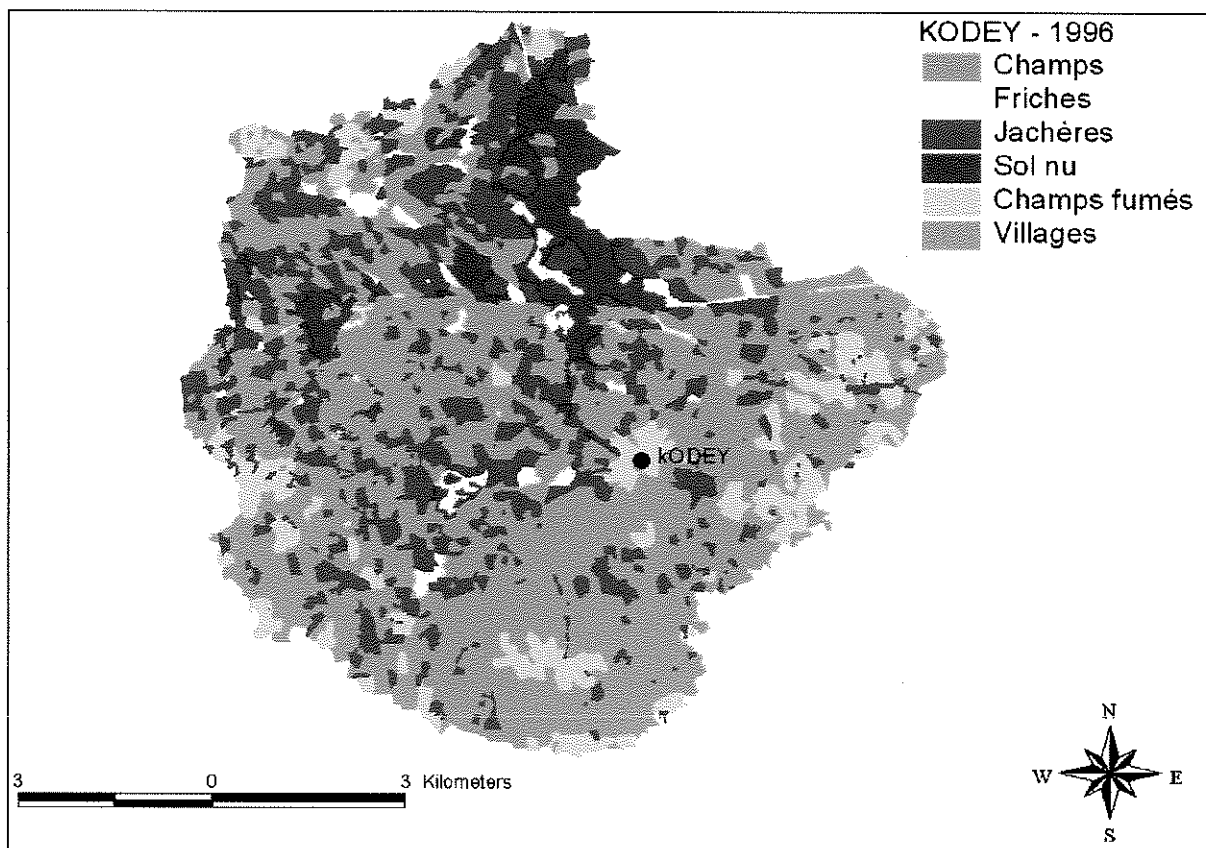
	1992	1994	1996
Champs	68%	70%	63%
C. fumés	7%	9%	7%
Friches	1%	2%	2%
Jachères	22%	17%	24%
Sols nus	2%	2%	4%
Habitat	0%	0%	0%

C. = champs





Carte 2.7 : L'occupation des sols du site de Kodey en 1996



## la carte des sols

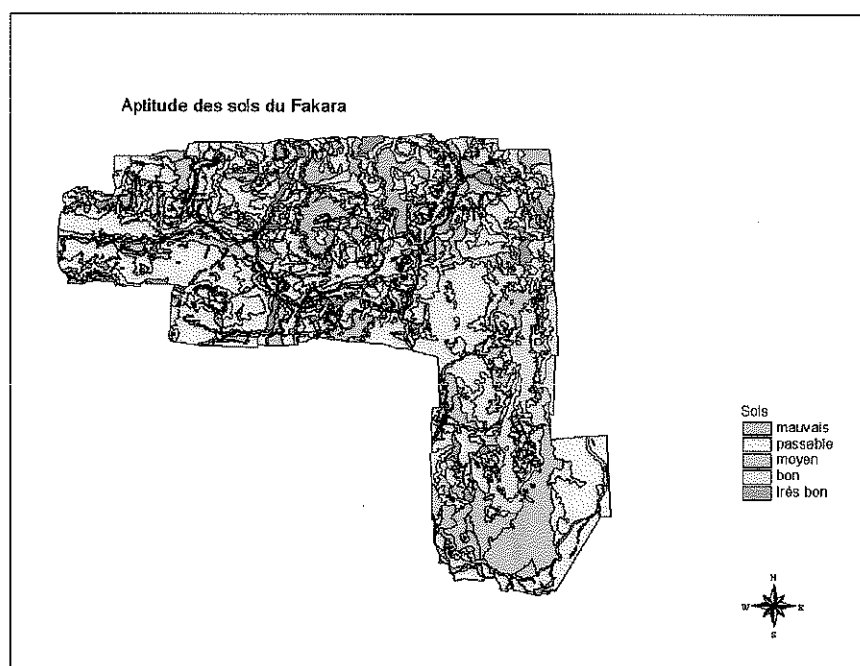
La carte des sols à l'image de l'occupation des sols provient d'une interprétation des photographies aériennes et couvre une superficie de 500 km<sup>2</sup> avec un cadrage géographique de latitude nord 13°20 et 13°35 et de longitude 2°35 à 2°52'. Plusieurs travaux menés dans la région ont permis de compléter la base de données. Trois critères ont servi à la cartographie des sols à savoir la position topographique, la morphologie et les caractéristiques de profondeur et de texture. (cf. carte 2.8 )

## les autres couches du SIE

Sur la base de l'interprétation de photographies aériennes, l'identification de plusieurs éléments de surface a permis de réaliser la couche géomorphologique. D'autres couches comme les points d'eau, les pistes à bétail, les pistes, les haies et les systèmes d'écoulements sont existants.

L'ensemble de ces couches et des données existantes permettent la modélisation du transfert des éléments nutritifs . Ces éléments vont servir à la réalisation de l'étude sur le changement d'échelle entre le terroir et la région par l'utilisation combinée de la télédétection haute et basse résolution.

**Carte 2.8**





Photographie 1 : Sol nu dans les terroirs du Fakara (août 2000)



Photographie 2 : Champ de mil dans les terroirs du Fakara (août 2000)

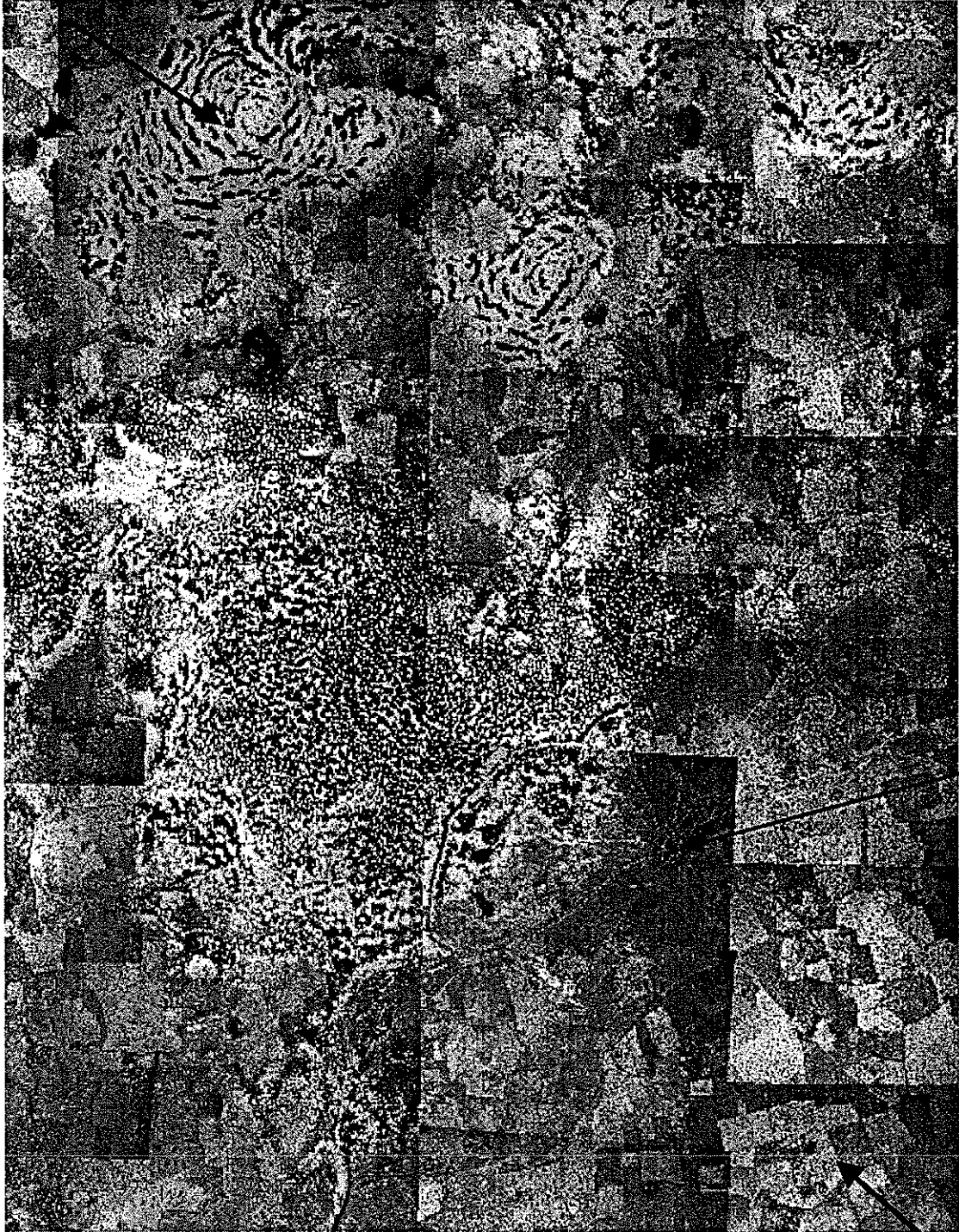


Photographie 3 : Jachère dans les terroirs du Fakara (août 2000)



Photographie 4 : Brousse tigrée dans les terroirs du Fakara (août 2000)

PHOTOGRAPHIE 5 : MOSAÏQUE DE PHOTOS AERIENNES DU SITE DE BANIZOUMBOU UTILISEE  
POUR LA REALISATION DE LA CARTE D'OCCUPATION DES SOLS DE 1996



Brousse tigrée

Villages

Champs

### 3. CHOIX D'UN INDICE POUR LE SUIVI DE LA VEGETATION

#### 3.1 Les images satellitales utilisées

##### a) les données de NOAA-AVHRR

Les données AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) utilisées dans cette étude proviennent de la Station de reception HRPT (High Resolution Picture Transmission) du Centre Régional Agrhymet basé à Niamey, Niger. L'instrument AVHRR dispose de 5 canaux sensibles dans le visible, le proche infra rouge, l'infrarouge thermique et le spectre électromagnétique. 9 satellites ont transporté le senseur AVHRR de 1978 à nos jours. Les images utilisées dans cette étude sont les synthèses décadaires de l'année 1998 et proviennent des images journalières issues de NOAA 14 lancé le 30/12/1994.

Le format des images est le type LAC (Local area coverage) . La résolution au sol est de 1.1 km en visée nadirale, c'est à dire, avec une altitude nominale sur orbite de 833 km, :

**Tableau 3.1 Caractéristiques spectrales de bandes de NOAA - AVHRR**

Band	NOAA 6, 8,10 Micromètre( $\mu\text{m}$ )	NOAA 7,9,11-14	IFOV Milliradians	
1	0.58 – 0.68	0.58 - 0.68	1.39	Rouge
2	0.725 – 1.10	0.725 - 1.10	1.41	Proche Infrarouge
3	3.55 – 3.93	3.55 - 3.93	1.51	Infra rouge thermique
4	10.50 – 11.50	10.3 – 11.3	1.40	Infra rouge thermique
5	10.50 – 11.50	11.5 - 12.5	1.30	Infra rouge thermique

## le traitement des données au Centre Régional Agrhymet

Les données reçues par le HRPT sont traitées à l'aide du logiciel LAS (Land Analysis system) mis en place par EROS DATA CENTER. Les différentes étapes sont identiques à celles citées dans Eidenshink et al. (1992).

Les premiers traitements effectués donnent les produits suivants :

**Table 3.2. Données AVHRR**

Band	Description	Band	Description
1	AVHRR channel 1	6	NDVI
2	AVHRR channel 2	7	Satellite zenith
3	AVHRR channel 3	8	Solar zenith
4	AVHRR channel 4	9	Relative azimuth
5	AVHRR channel 5	10	Date Index

Les données sont en format BSQ, 8 bits, et fournies dans un système de coordonnées en degrés décimaux et en projection plate carrée.

### **b) les données SPOT VEGETATION**

Depuis le lancement de SPOT 4 avec l'instrument VEGETATION en 1998, celui s'est avéré à partir de ces produits, comme performant dans la gestion des ressources naturelles (suivi des cultures, des forêts, la dégradation des sols et le suivi des déprédateurs (Tychon et al., 1999). Les caractéristiques spectrales de VEGETATION sont les suivantes :

B0 (bleu) :	0.43 – 0.47 $\mu\text{m}$
B2 (rouge) :	0.61 – 0.68 $\mu\text{m}$
B3 (Proche Infra rouge) :	0.78 – 0.89 $\mu\text{m}$
MIR (Infra rouge onde courte) :	1.58 – 1.75 $\mu\text{m}$

L'une des nouveautés par rapport à NOAA-AVHRR est ce dernier canal appelé MIR (Middle Infrared ou moyen infra-rouge) ou SWIR (Shortwave Infrared) en anglais. Ce canal est la portion comprise entre le proche infra rouge et le l'infra rouge thermique. C'est la région du spectre qui est intéressante pour les études des laves volcaniques mais aussi pour la végétation. Dans le moyen infra rouge, le contenu en eau de la végétation est très important dans la réflectance (Bartholomé, 2000). Aussi, pour des applications relatifs au stress hydrique des plantes, ce canal peut être intéressant à prospecter. De même, dans le cas des sols, la présence d'eau fait diminuer la réflectance des sols dans le moyen infra rouge. VEGETATION, avec ces performances peut être intéressant dans l'étude du bilan hydrique avec une possibilité d'amélioration des modèles existants en agrométéorologie tels que DHC (modèle diagnostique des cultures ) ou SISP ( système intégré de suivi des cultures) au Centre Régional Agrhymet.

Les trois produits standards de VEGETATION sont les suivants :

VGT-P

VGT-S1 (journalier)

VGT-S10 (décadaire)

Ceux utilisés au cours de ce travail sont des produits de type S10. Les produits de ce type sont des synthèses décadaires. La méthode du maximum de valeur composée est utilisée afin de diminuer l'effet de la couverture nuageuse. La résolution de ces produits est de  $1 * 1 \text{ km}^2$ .

Les données du senseur VEGETATION à la différence de NOAA –AVHRR ont pour cible essentielle le couvert végétal et le sol. C'est pourquoi les différents canaux représentent les caractéristiques spectrales du couvert végétal (Pekel, 2000).

- Le canal rouge est centré sur le pic d'absorption de la chlorophylle ( $0.665 \mu\text{m}$ ),
- le canal proche infra rouge correspond au maximum de réflectance et est en relation avec le couvert végétal et ses propriétés.
- Le canal infra rouge moyen est en relation avec la quantité d'eau contenue dans la végétation.

### 3.2. Choix d'un indice complémentaire pour le suivi de la végétation au Sahel

L'observation de la végétation sahélienne à l'aide des satellites basse résolution comme AVHRR et SPOT VEGETATION est confrontée à la variabilité des propriétés spectrales des sols, leur couleur et leur brillance (Bannari et al., 1996). Pour minimiser ces effets et rehausser le signal issu de la végétation, plusieurs indices de végétation ont été développés et testés avec les différents senseurs (Bartholomé, 1989). En effet, Le comportement des végétaux varie selon les différentes longueurs d'onde à cause de leur contenu en eau et des espaces intercellulaires. Dans le visible, entre 400 nm et 700 nm, les pigments comme la chlorophylle, la protochlorophylle et les xanthophylles sont très absorbants. Cela se traduit par un caractère sombre des couverts végétaux avec une légère réflectivité autour de 550 nm. Dans les ondes situés entre 700 et 1300 nm, la brillance du couvert est très élevée. Cette partie du spectre est une zone de transition entre l'absorption dans le visible et les vibrations moléculaires dans les longueurs d'onde élevés (Terrill, 1994). La végétation est aussi sombre entre 1300 nm et 2500 nm à cause de l'absorption hydrique des plantes. Aussi, afin de mettre en exergue l'activité photosynthétique, la mise en ratio de bandes où la végétation est plus brillante avec les bandes où la végétation est très dense a permis d'avoir des indices intéressants de vigueur. Aussi, le rouge et le proche infra-rouge se sont montrés plus intéressants que le vert et le rouge par exemple.

La plupart des indices utilisent donc les canaux rouge (R) et proche infra rouge (PIR) ou le rouge-bleu et le proche infrarouge. L'intérêt pour le rouge et le proche infrarouge provient du fait que les plantes vivantes absorbent dans l'un et réfléchissent dans l'autre. Le rayonnement visible du rouge est absorbé par la chlorophylle tandis que le rayonnement du proche infra rouge est fortement réfléchi. L'absorption est identique dans le bleu et le rouge alors que le vert montre une légère réflexion.

Aussi, pour avoir un contraste élevé de la présence de végétation, les combinaisons de ces canaux permettent de rehausser la présence de végétation. Les hypothèses de l'influence de la végétation sur les variations d'indice ont fait l'objet de beaucoup de recherches (Terje, 1993). En effet, dans les zones à faible



couverture végétale, l'arrière plan sol provoque des bruits gênants. L'étude de la végétation par la télédétection a montré par ailleurs que la réflectance des états de surface est fonction de plusieurs facteurs qui se résument en des facteurs externes et internes. Ces facteurs sont l'inclinaison, l'angle zénithal, l'orientation du soleil et des instruments portés. D'autres facteurs comme la turbidité atmosphérique joue aussi sur la radiation diffuse et directe (Major, 1990).

Les indices créés pour atténuer cet impact du sol dans le suivi de la végétation peuvent être classés en indice de type rapport ou proportionnel et de type orthogonal (Huete, 1989). La plupart de ces indices sont fondés sur la théorie de la ligne des sols. La revue bibliographique sur ces indices qui suit permettra de justifier le choix des indices à étudier par la suite.

### a) les indices de végétation

Tableau 3.3. Les indices de végétation (adapté de Elvidge and Chen, 1995, in SANDISON, 1999)

RVI, Jordan (1969)	Ratio Vegetation Index	$PIR / R$
NDVI, Rouse <i>et al.</i> (1973)	Indice de Végétation normalisé	$NDVI = (PIR-R) / (PIR+R)$
PVI, Richardson and Weigard (1977)	Perpendicular Vegetation Index **	$PVI = (IR-bR-a)/\cos \alpha$
SAVI Huete (1988)	Indice de végétation d'ajustement des sols*	$SAVI = [(PIR-R)/(PIR+R+L)]*(1+L)$
MSAVI Qi <i>et al.</i> (1994)	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$MSAVI=[(PIR-R)/(PIR+R+L)]*(1+L)$
TSAVI Baret <i>et al.</i> (1989)	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index **	$TSAVI = \frac{[b*(PIR-(b*R))-a]}{[(b*PIR)+R-(a*b)+(X*(1+b^2))]}$

- ( b et a sont respectivement la pente et la constante et X est un facteur d'ajustement égal à 0.08)
- Dans MSAVI,  $L = 1 - 2 bNDVI * WNDVI$  et  $WDVI = PIR - b(R)$
- Dans le PVI,  $\alpha$  est l'angle que forme la droite des sols avec l'abscisse.

Sur la base de la ligne des sols, différents indices de végétation ont été créés et sont caractérisés par leur géométrie par rapport à la ligne des sols. On distingue ainsi des indices perpendiculaires et les indices proportionnels. D'autres auteurs discriminent les indices selon les différents canaux. De nouveaux indices sont calculés aussi à partir du moyen infra rouge.

En tenant compte de la géométrie des indices par rapport à la ligne des sols, les indices perpendiculaires partent de l'hypothèse que les lignes de végétation identiques sont parallèles à l'axe de la ligne des sols. Ils mesurent donc la distance perpendiculaire par rapport à cet axe. C'est le cas du PVI qui sera expliqué dans les chapitres qui suivent. Les autres indices qui sont des indices proportionnels vont de l'hypothèse que les lignes d'égale végétation démarrent en un même point. Ces indices mesurent donc la pente que forme la droite des sols avec ce point de convergence. C'est le cas du NDVI, du SAVI et du RVI qui seront aussi expliqués dans les chapitres qui suivent.

Les indices basés sur le moyen infra rouge et des indices dits complexes sont aussi nés pour la détection de l'arrière plan sol et la résolution des problèmes de décomposition du signal dans les pixels.

### les indices proportionnels

Les deux indices les plus utilisés sont le rapport simple et l'indice de végétation normalisé.

#### ***le rapport simple (RVI)***

Ce rapport sert généralement à mettre en relief la présence de la végétation sur les images. Il a été décrit pour la première fois par Jordan (1969) cité dans Terril (1994). Des expériences menées avec le RVI en utilisant le modèle de simulation de l'indice foliaire, SAIL (Scattering by Arbitrarily Inclined Layers),(Verhoef,1984) montrent une altération de l'indice à l'humidité des sols, la salinité, la rugosité, l'ombrage et la matière organique. Cet indice est sensible du fait de la haute

réflectivité du proche infra rouge. La différence entre sol sec et humide n'est pas très visible . Sur le plan de la végétation, le RVI est seulement sensible à des couverts de l'ordre de 50% de recouvrement (Bartholomé, 1989). Il n'est pas très intéressant pour la végétation clairsemée de la zone sahélienne.

### ***L'indice de végétation normalisé ( NDVI)***

L'indice de la différence normalisée « NDVI » qui est la différence des deux canaux rouge et proche infra rouge divisée par leur somme a été proposé par Rouse et al. en 1973 et Tucker en 1979 cités par Bannari et al., (1996). Le NDVI fait partie des nombreux indices dérivés des mesures de réflectance spectrale dans différentes bandes de longueurs d'ondes. Son principe se base sur les différences de réflexion au rouge et au proche infrarouge de la matière végétale verte. En effet, dans le rouge, l'intensité du rayonnement diminue avec l'augmentation de la biomasse verte par suite d'une absorption de la radiation incidente par la chlorophylle des plantes. Dans le proche infrarouge, elle augmente légèrement avec l'augmentation de la biomasse verte par suite de la diffusion des radiations par les parois hydratées des cellules foliaires (Hiernaux, 1988). Ces avantages sont essentiellement liés à sa liaison avec l'activité photosynthétique. Par ailleurs, il permet de minimiser les effets atmosphériques. En effet, l'atmosphère agit plus ou moins de la même façon sur les deux canaux et leur différence n'est pas influencée.

Sur le plan du concept, cette normalisation réduit les effets de l'arrière plan sol et discrimine le spectre de la végétation (Justice, 1986). Il est sur le plan fonctionnel équivalent au RVI sauf qu'il varie de  $-1$  à  $1$  et le RVI varie de  $0$  à l'infini. Les mesures de NDVI sont aussi effectuées au sol à l'aide de radiomètre ou d'instruments aéroportés. Dans le Sahel, ces mesures ont été effectuées dans un objectif de calibration et de comparaison des données satellitaires au Mali et au Niger dès 1987 (Hiernaux, 1988 ; Wagenaar et al., 1987).

Une meilleure utilisation du NDVI suppose un prétraitement en vue d'atténuer les problèmes liés aux interférences astronomiques, atmosphériques et aux corrections géographiques. Les méthodes de correction des données aussi bien atmosphériques que des interférences liées à la nature du substrat sol, n'éliminent

pas complètement les distorsions constatées sur la valeur du NDVI. De même, les distorsions géographiques causées par la dimension du pixel élémentaire et le système de balayage ne sont pas totalement éliminées (Holben et al., 1984). Malgré ces imperfections des images NDVI, celles-ci se sont avérées les plus indiquées pour l'étude de la végétation même dans des conditions atmosphériques sévères.

Dans la littérature, on retrouve d'autres versions du NDVI comme le IPVI (Infrared Percentage Vegetation Index) développé par Cripenn (1990) pour éliminer les valeurs négatives du NDVI et la simple différence entre le proche infra rouge et le rouge décrit par Richardson et al. (1992) et par Lillesand et al. (1994).

D'autres versions de NDVI ont vu le jour comme l'ARVI (Atmospherically Resistance Vegetation Index). Verstraete et al. (1991) repris par Bannari et al. (1995) proposent le GEMI qui est un indice de végétation non linéaire pour mieux tenir compte des perturbations atmosphériques.

#### les indices orthogonaux

##### ***l'indice de végétation perpendiculaire (PVI)***

Elle<sup>il</sup> exploite la philosophie de la droite des sols nus (pente et origine) et permet d'éliminer les différences de l'arrière plan sol. Cet indice a été développé par Richardson et Weigang (1977) et représente la distance du point considéré dans le plan rouge-proche infrarouge à la droite des sols nus. Cet indice permet une différenciation des lignes de sols avec différentes pentes.

Il reste très sensible aux variations atmosphériques selon les travaux de Qi et al. (1994) et surestime les sols humides à cause de sa sensibilité à l'humidité des sols. Cet indice a une dynamique importante et sa valeur est voisine de 0 sur les sols nus.

En 1988, Clevers repris par Qi et al., (1994) introduit le WDV (Weighted Difference Vegetation Index) qui est une simplification mathématique du PVI. Cet indice reste très sensible aux variations atmosphériques (Qi et al., 1994).

### ***le SAVI (Soil adjusted Vegetation Index)***

Il permet d'éliminer aussi les différences liés à l'arrière plan sol. Il a été proposé par Huete (1988). Il démontre qu'il existe une certaine contradiction entre la manière dont les indices NDVI et PVI décrivent le comportement spectral des sols et de la végétation. En d'autres termes, Il a été conçu pour réduire l'effet de brillance des sols en ajoutant deux paramètres aux différents canaux. Cet indice est un compromis entre les indices de type orthogonal (PVI) avec lequel il se confond et les indices de type rapport (Bannari et al., 1996).

SAVI s'est avéré pendant longtemps comme un des meilleurs indices de végétation sur le plan théorique. Cependant dans l'estimation du LAI (leaf Area Index), il montre une légère différence dans le facteur de correction d'un LAI de 1 par rapport aux valeurs généralement admises. Sa formule contient un facteur de correction L trouvé empiriquement. Il varie de 0 pour les couverts denses et 1 pour les sols presque nus. La valeur La plus utilisée est 0.5 (Bartholomé, 2000).

Lo Seen et al. (1995), dans la mise en œuvre du modèle STEP, montrent que le SAVI est un bon indicateur de la végétation si les effets atmosphériques sont annulés. De nouvelles versions de SAVI montrent que les pentes et les ordonnées à l'origine changent selon le LAI.

Dans les sites du FAKARA, Leeuwen et al. (1993) montrent que le SAVI est un bon indicateur des conditions difficiles et le recommandent pour le suivi de la croissance de la végétation dans les espaces clairsemés du Sahel.

### ***le MSAVI (Modified Soil adjusted Vegetation Index) 1 et 2***

D'autres auteurs comme Qi et al (1994) proposent une version modifiée du SAVI (MSAVI) pour pallier au problème de variabilité du facteur empirique L en fonction de l'importance du couvert végétal. Dans la formule du SAVI, la constante L dépend et varie en réalité avec le niveau de la couverture végétale. L'hypothèse retenue dans la création du MSAVI est de corriger le facteur L sur la base du NDVI et

de l'indice pondéré en supposant que les lignes de végétation identiques ne convergent pas vers le même point.

En poursuivant leur logique, Qi et al (1994) introduisent une seconde version du MSAVI comme une amélioration du premier et éliminent dans les calculs la prise en compte des indices NDVI et WdVI (Weighted difference vegetation index), de même que les paramètres de calcul de la ligne des sols.

.Leprieur et al. (2000) montrent la supériorité de MSAVI par rapport au GEMI pour la détection de couverts faibles.

### ***le TSAVI (transformed Soil adjusted Vegetation Index)***

Le TSAVI est né de BARET et al (1989) à partir d'une approche similaire au PVI qui a été ensuite transformée par la suite en y ajoutant un facteur additif de 0.08 pour minimiser l'effet de l'arrière plan sol. Cet indice va du principe que la pente et l'ordonnée à l'origine de la ligne des sols est arbitraire et que le point de convergence des lignes d'égale végétation va de l'origine au point 0.05 du SAVI. La différence avec SAVI vient du fait que les paramètres de la ligne des sols sont fonction du lieu et non standardisés avec une pente de 1 et l'ordonnée à l'origine.

Dans le même sens, Bannari et al (1994) cité dans Bannari et al (1995) proposent le TSARVI basé sur la substitution du canal rouge par le canal rouge-bleu. Cette substitution a été proposée par Kaufman et Tanre (1992). Pour les effets atmosphériques et la brillance des sols, le ARVI a été créé par Plummer et al (1994) cité dans Bannari et al. (1995) avec un autre capteur ATSR-2. Major (1990) et Bannari et al. (1996) soutiennent la performance du SAVI ou de ses dérivés comme le TSAVI car il permet de réduire l'effet de la brillance des sols, l'effet du soleil et du port du couvert en fonction de la densité de la végétation. L'utilisation de modèle de transfert radiatif a permis d'évaluer la sensibilité de ces indices à la couleur et à la brillance des sols et de tester leur pouvoir de description du couvert végétal . Le modèle radiatif utilisé par Bannari et al. (1996) décompose la réflectance résultante mesurée au capteur au dessus d'un couvert végétal en deux composantes, celle intrinsèque au couvert végétal et celle intrinsèque au sol. Les résultats atteints par

Bannari montrent que les indices GEMI, AVI, NDVI, ARVI, PVI sont moins performants pour les végétations clairsemées comme celles du Sahel (Bannari, 1996). Il propose l'application du TSAVI sur de grandes échelles afin de confirmer la supériorité de cet indice observée à partir de mesures radiométriques au sol.

### ***le AA-NDVI ou Area Additive Normalised Difference Vegetation Index***

Elle est basée sur le fait que la réflectance du sol est fonction de ses différentes composantes et du paysage. Dans leur étude sur le Gourma malien Hanan et al (1991) montrent que cet indice permet d'obtenir la réflectance de la composante végétation si l'extension géographique est connue. Cet indice permet d'approcher le problème de la décomposition spectrale des pixels mais aussi de calculer la couverture fractionnelle de végétation.

### ***les indices de végétation utilisant le moyen infrarouge***

Ce type d'indice, du fait de l'existence des images SPOT VEGETATION sur la région sahélienne et des éléments très prometteurs trouvés dans la bibliographie augure d'un bon avenir.

Dans les autres indices traités ci-dessus, l'arrière plan sol est confondu avec le sol dans la plupart des cas. Au Sahel, et plus particulièrement dans les zones agro-pastorales, cet arrière plan comprend les résidus des cultures très intéressants dans le cadre de l'alimentation du bétail. Après les récoltes, le bétail sahélien durant 2 à 4 mois parcourent uniquement sur les champs et utilisent les résidus de récoltes (tiges et fanes) pour se nourrir. Avec le moyen infra rouge, des travaux menés au Canada par McNairn et Protz cité dans Bonn (1998) ont montré qu'en combinant les canaux 4 et 5 du Thematic Mapper de Landsat, les résidus de récolte pouvaient être appréciés dans le cas du maïs. Par ailleurs, le même auteur souligne l'ajustement de la droite des sols par Biard et al dans l'espace PIR/MIR par le développement d'un indice le SACRI (Soil Adjusted Corn Residue Index) définit comme suit :

$$\text{SACRI} = \alpha [\rho(\text{PIR}) - \alpha \beta(\text{MIR})] - \beta / \rho(\text{MIR}) + \alpha \rho(\text{PIR}) - \alpha \beta$$

où  $\rho(\text{PIR})$  et  $\rho(\text{MIR})$  sont les réflectances dans le proche et le moyen infrarouge et  $\alpha$  et  $\beta$  sont la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite des sols dans l'espace PIR/MIR.

Le SACRI a permis d'évaluer les taux de recouvrement du sol par les résidus avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 80%.

Un autre indice, le SWIRVI ou MIRVI est la différence normalisée entre le moyen infra rouge et le proche infrarouge serait intéressant dans le suivi de la biomasse végétale. Des perspectives s'offrent aussi avec le moyen infra rouge dans la cartographie des surfaces brûlées (Mayaux et al, 2000).

### ***une technique de décomposition de l'effet sol :La déconvolution linéaire***

La déconvolution linéaire consiste à définir des composantes spectrales homogènes d'un état de surface donné (sol, eau, etc.). Elle va de l'hypothèse que pour chaque pixel de l'image, la réflectance est une combinaison linéaire des réflectances de chaque composante spectrale homogène, pondérée par le taux de présence de cette composante dans le pixel (Bonn, 1998). Elle nécessite la présence du canal moyen infra rouge comme dans SPOT VEGETATION et LANDSAT TM. Elle donne de bons résultats dans de larges gammes de couvertures de sols (Maselli, 1998, Leprieur et al., 2000).

Cette nouvelle technique, différente de la mise au point d'indices de végétation, permet de pallier le problème des couverts végétaux clairsemés et mixtes.

Après cette revue bibliographique, la ligne des sols demeure l'élément clé dans le calcul des indices de végétation basés sur le rouge et le proche infra rouge. Le point qui suit traite de la démarche utilisée dans la présente étude pour calculer et disposer des paramètres de la ligne des sols sur la zone d'étude.



## **b) La ligne des sols**

Les paramètres de la ligne des sols servent à calculer la plupart des indices. La théorie de la ligne des sols se base sur le fait que le spectre des sols nus dans le rouge et le proche infra rouge est fonction de la distribution de la réflectance bidirectionnelle et des propriétés de polarisation (Huete et al, 1991). Ce spectre varie selon la brillance due au flux reflété et à l'absorption liée aux aspects physico-chimiques des sols. Pour la ligne des sols, les caractéristiques de brillance donnent un axe principal de variation spectrale dans les longueurs d'onde du rouge et du proche infra rouge. Les aspects d'absorption liés aux caractéristiques biochimiques indiquent la variabilité autour de cet axe.

La ligne des sols est représentée par la diagonale principale de l'espace des canaux rouge et proche infra rouge et caractérisent au mieux le comportement réflectif des objets (Bartholomé, 1989). En effet, la réflectance et la brillance varient dans le même sens. La droite des sols nus dans l'espace spectral rouge et proche infra rouge se traduit par une équation linéaire de premier degré entre les deux. Ce concept normalise le comportement des sols et discrimine le spectre de la végétation (Huete , 1989). Aussi, la ligne des sols est aussi appelé la ligne du zéro végétation.

### détermination de la ligne des sols

Décrivant la variation dans l'espace des sols nus, la ligne des sols est déterminée par la recherche des valeurs de sols nus avec différentes réflectivités et la recherche du meilleur ajustement de la ligne spectrale entre les différents sols.

Une deuxième approche consiste à représenter la dispersion des valeurs d'un ensemble de pixel des canaux rouge et proche infra rouge. Plusieurs auteurs recommandent de prendre le rouge comme valeur de x et le proche infra rouge comme valeur de y. Dans l'élaboration des différents indices, certaines écoles (CLARK Labs, 1998) proposent le choix de la variable indépendante selon les indices. Ainsi, pour l'indice perpendiculaire de végétation (PVI) par exemple ou le TSAVI, la variable indépendante est respectivement le canal proche infra rouge et le rouge.

## ***résultats obtenus sur l'imagerie VEGETATION***

Afin de déterminer la droite des lignes, l'approche retenue a été de considérer une zone invariante comme un sol nu dans une première hypothèse. L'invariabilité de cette zone a été vérifiée sur toutes les décades de 1998 sur lesquelles les images sont disponibles. La deuxième hypothèse porte sur le choix du mois le plus sec de la saison qui est le mois d'avril au Niger comme étant le mois où les sols sont effectivement nus.

### ***détermination des zones invariantes***

En 1997, l'étude sur le front de végétation (Djaby et al, 1997) a permis de déterminer sur la base d'images d'indice de végétation GAC (Global Area Coverage), des zones invariantes dans les pays du Sahel. Cette partie de la détermination de ces zones est reprise dans la présente étude.

La détermination de la zone de référence s'est faite suivant l'hypothèse stricte qu'une zone stable est constituée d'un ou de plusieurs pixels dont l'amplitude ou l'étendue sur 36 décades est presque nulle.

Pour une série annuelle d'images NDVI, on calcule

$$A = [\text{NDVI max}] - [\text{NDVI min}]$$

Où A est l'amplitude, NDVI max et NDVI min sont respectivement la valeur maximale et minimale de l'indice sur la période considérée.

Pour la suite des travaux, notamment l'analyse des profils et l'utilisation du système d'information géographique, trois formes sont retenues pour représenter les zones invariantes (points, lignes, polygones). Sur l'ensemble des pays du CILSS, les zones invariantes sont situées au Nord de la Mauritanie, du Mali, du Niger, et du Tchad comme l'indique la carte 3.1. Cette zone confirme la stabilité du NDVI dans les zones désertiques.

Les caractéristiques géographiques de ces zones sont données en tableau 3.4. Dans ce tableau, X et Y expriment respectivement la longitude et la latitude pour les transects. Pour les coordonnées qui sont données au titre des polygones, les deux valeurs donnent la longitude et la latitude en degrés décimaux. Des exemples de profils de la zone du Niger sont donnés en graphique 3.1. Ces figures indiquent que l'amplitude maximale des transects invariants est de  $\pm 2$  comptes numériques.

Parmi les transects invariants des différents pays, l'évolution inter-annuelle montre une plus grande stabilité du transect du Niger. La zone correspond à une multitude de chaînes de montagnes sans végétation avec une pluviosité presque nulle. Des interférences liées à la poussière pourrait causer des perturbations sur le signal mais cela n'apparaît pas sur les valeurs de NDVI. Sur les images GAC de 1985 à 1995, les résultats de l'analyse de variance indiquent qu'il n'y a pas de différence significative entre les différentes décades mais aussi entre les mois. Les variations inter-annuelles sont de l'ordre de 5 comptes numériques.

**Tableau 3.4 : Caractéristiques géographiques des transects et polygones en degrés décimaux**

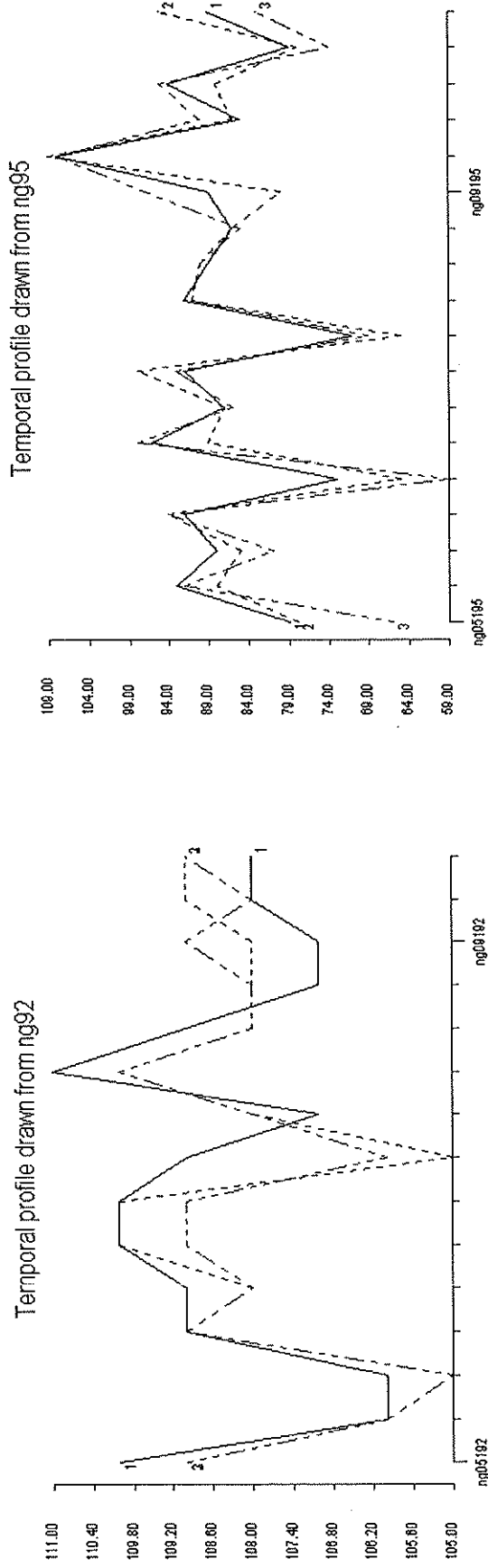
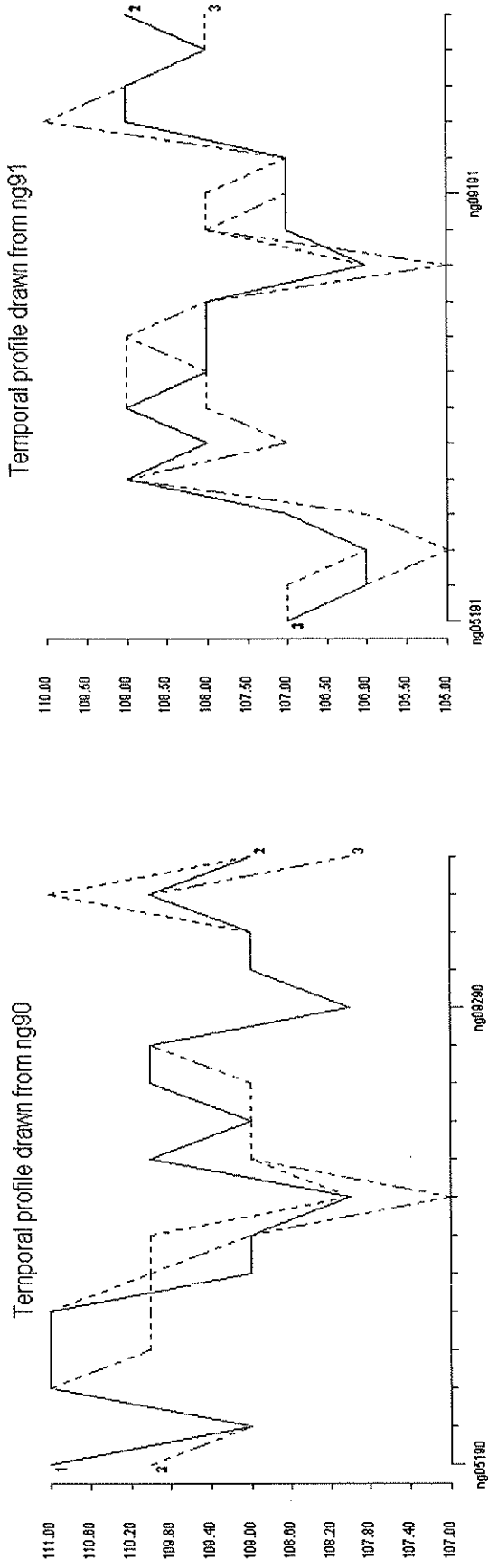
Pays	Niger	Tchad	Mali
Transect	Min. x : 9.75	Min. X1,X2 : 20.03,18.85	Min. X : -3.87
	Max. x : 10.15	max. X1,X2 : 20.18,18.98	Max. X : -1.89
	Min. Y : 19.47	min. Y1,Y2 : 20.32,16.56	Min. Y : 19.88
	Max. y : 20.51	max. y1,Y2 : 21.29,17.54	Max. Y : 22.54
Point 1	1 : 9.74, 19.68	1 : 20.17,20.87	1 :-1.50,22.27
Point 2	2 : 9.73, 20.16	2 : 17.42,16.84	2 :-2.32,21.77
Point 3	3 : 10.08, 20.37	3 : 19.42,17.95	3 : -3.05,21.07
Point 4	4 : 20.02, 20.45	4 : 19.27,16.91	4 : -4.61,19.39
Point 5		5 :-2.01,22.26	

Niger a des réflectances plus élevées que des sols nus se trouvant dans la région. Ces sols plus sablonneux ont des réflectances plus faibles de l'ordre 20%. Cette zone particulière en plus de la zone invariante couvre une plus grande partie du nord est (carte 3.2).

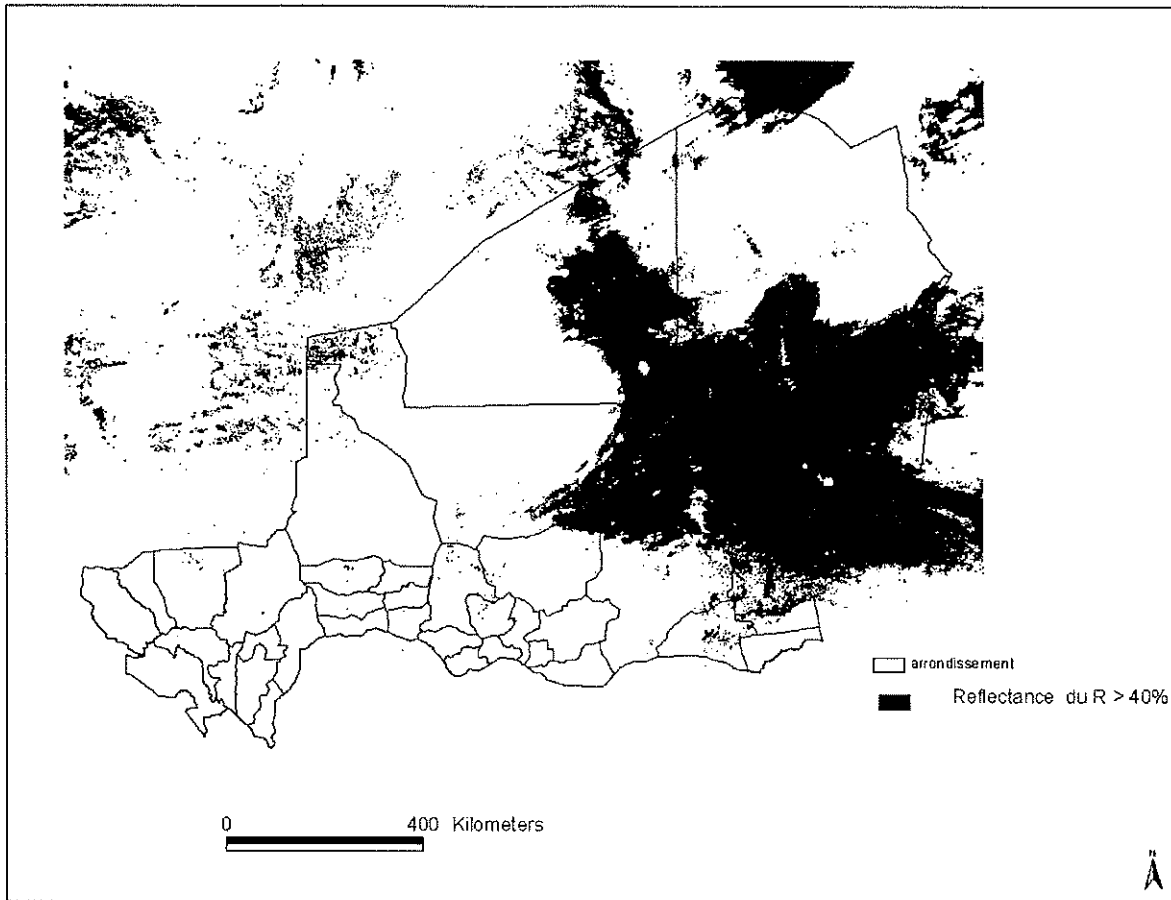
On note aussi que la variation spatiale dans la zone invariante est linéaire. Pour deux points donnés, la différence de réflectance dans le canal rouge est identique à celui du canal infra rouge. Ce comportement spectrale répond bien à l'hypothèse de définition théorique de la ligne des sols.

**Graphique 3.1 : Profils Temporels des points invariants du Niger de 1990, 1991, 1992, 1993, 1995**

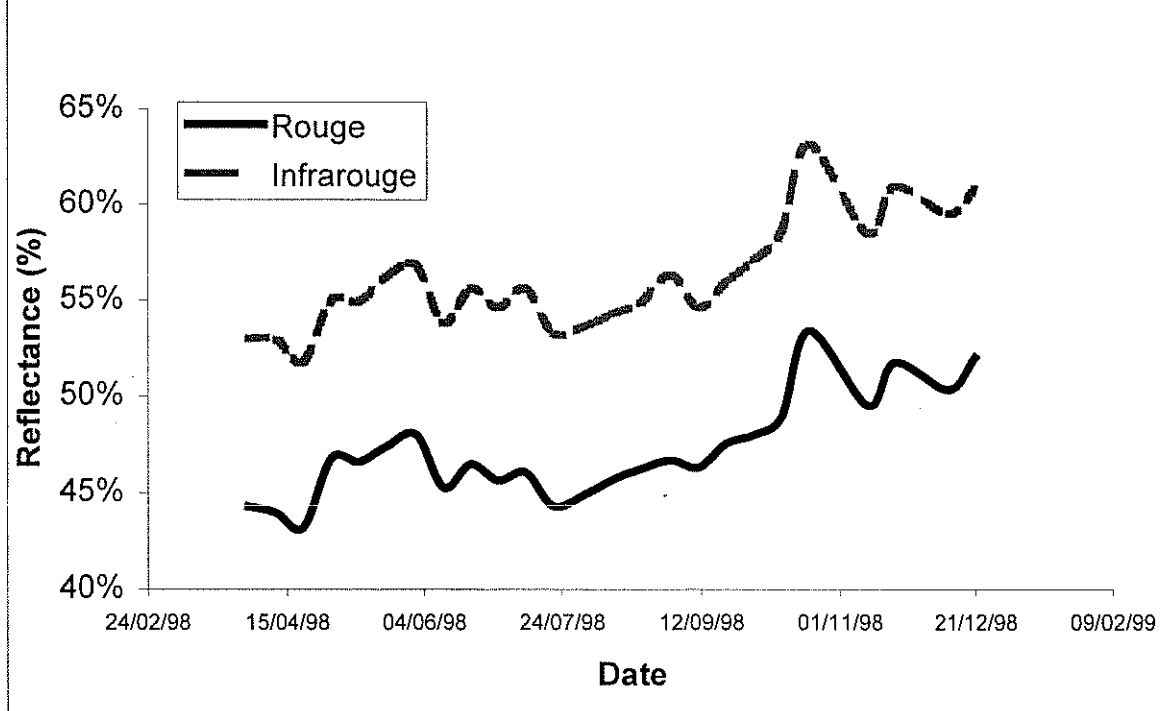
(les abscisses des courbes sont des décades et les ordonnées des comptes numériques d'indice de végétation)



**Carte 3.2 Zone du Niger où la réflectance dans le canal rouge est supérieure à 40%**

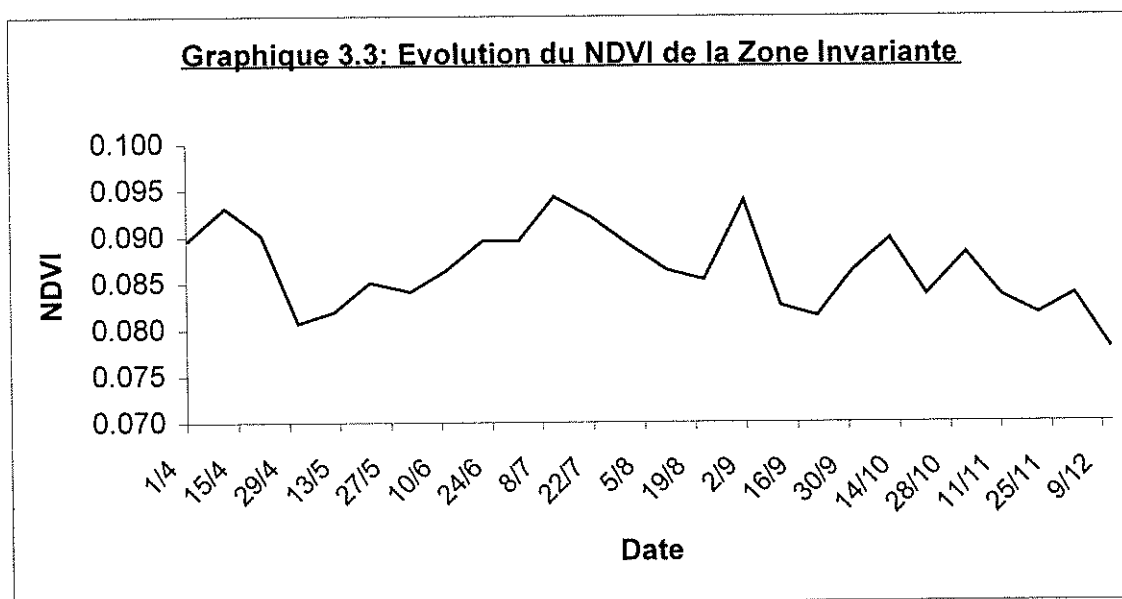


**Graphique 3.2: Profil de la réflectance de la zone invariante du Niger dans le canal rouge et le proche infra-rouge en 1998**



### **le profil du NDVI de la zone invariante**

La tendance de l'indice de végétation sur la même zone montre des valeurs assez stables tout le long de l'année compris entre 0.08 et 0.095 (cf graphique 3.3). Le coefficient de variation qui est le rapport de l'écart type à la moyenne est de l'ordre de 5%. La stabilité temporelle du NDVI sur cette zone invariante est alors confirmée. Elle est considérée pour la suite de l'étude comme un sol nu sur le plan du comportement spectral dans le rouge et le proche infra-rouge.



### **les paramètres de la ligne des sols**

Sur la base des définitions de la ligne des sols et des différentes hypothèses, la ligne des sols a été déterminée à partir des images des canaux rouge et proche infra rouge de SPOT VEGETATION par deux méthodes. La première hypothèse est que sur le Niger, les pluies débutent en Mai, voir juin et les sols avant cette date sont nus et brillants au soleil. Aussi, la ligne des sols peut être déterminée sur la base des valeurs des pixels de l'ensemble du pays mais dans ce cas, seule la base du nuage de points doit être considéré pour être ajustée car c'est là que se trouvent les sols nus.

La deuxième hypothèse est de rechercher la ligne des sols sur une zone nue ou des zones rocheuses ou sablonneuses (Huete, 1991). Pour ce faire, les zones

déterminées dans l'étude du front de végétation situées au Niger ont été utilisées compte tenu de leur stabilité dans le temps avec les canaux et indices dérivés des images de SPOT VEGETATION (cas du NDVI).

Pour déterminer les paramètres de l'équation de la ligne des sols, les paramètres de la régression entre les deux canaux sur les valeurs moyennes par décade ont été recherchés. L'équation trouvée (cf tableau 3.5 ) montre bien la liaison étroite entre les deux canaux pour les sols nus avec une probabilité significative à moins de 1 pour mille. *L'équation de ligne des sols est donc  $Y=14.23+1.0684x$* , Y étant le proche infra rouge et x le rouge. Le graphique 3.4 donne la représentation de la ligne des sols.

**Tableau 3.5 : Paramètres de la ligne des sols sur la zone invariante.**

---

\*\*\* Estimation des coefficients de la régression \*\*\*

---

	estimate	s.e.	t(23)	t pr.
Constant	14.23	3.72	3.82	<.001
C2	1.0684	0.0315	33.88	<.001

En considérant un seul mois, celui d'avril sur l'ensemble des pixels du pays, on obtient une équation similaire  $Y=14.13+1.07x$  par régression des deux images des canaux rouge et proche infra rouge (cf. graphique 3.5). Les valeurs obtenues sont très similaires à celles trouvées par Huete ( 1991) dans le désert du Sahara. Toute fois on peut remarquer au début de la courbe une plus forte hétérogénéité dans les valeurs du proche infra rouge pour la même valeur de rouge. Cette tendance est liée certainement à un autre facteur qui intervient dans l'influence des sols sur les indices. Certains auteurs remettent justement en cause la linéarité de la ligne des sols (Huete, 1991, Bannari et al., 1996).

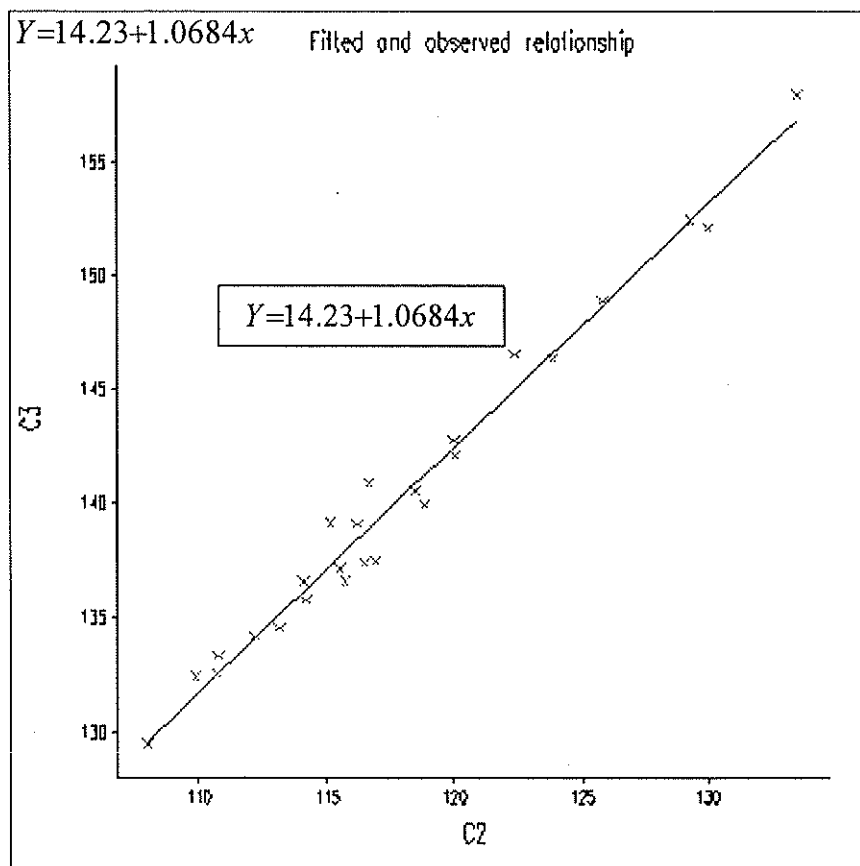
Une des conclusions à laquelle nous aboutissons est que la ligne des sols peut être déterminée par deux méthodes :



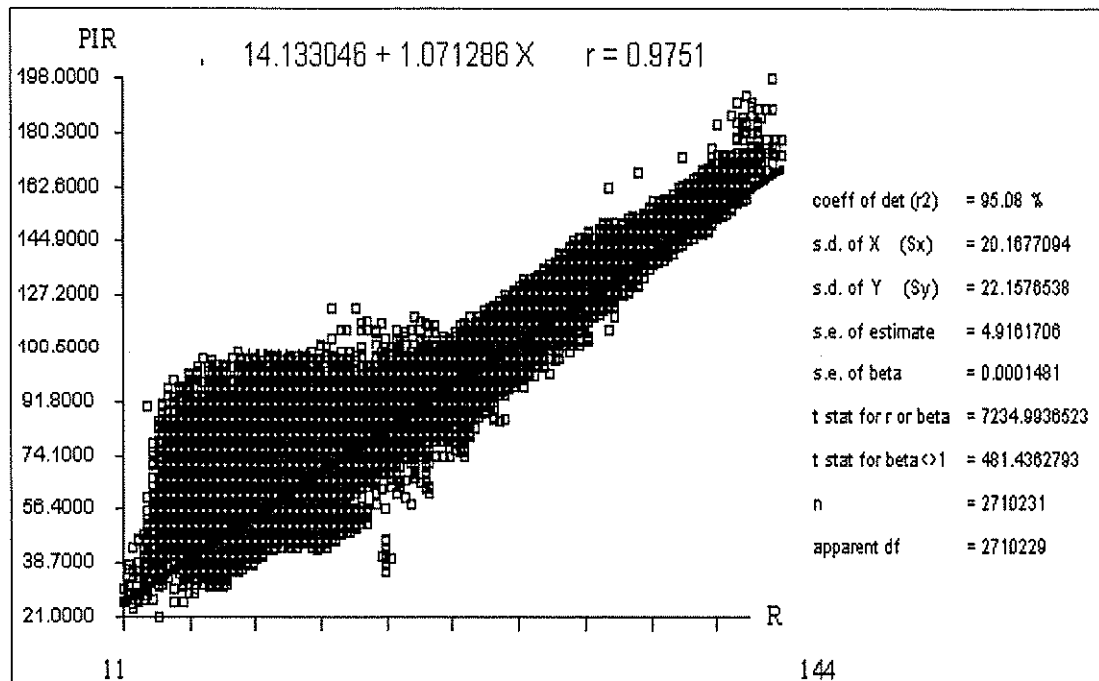
- le choix d'une période sans végétation avec une très faible variabilité au niveau spatial
- Une zone invariante avec une très faible variabilité de la réflectance au niveau temporel.

Les valeurs obtenues, la pente et l'ordonnée à l'origine seront utilisées pour le calcul du TSAVI. Le problème de la détermination de la ligne des sols à grande échelle ou sur de grandes zones reste toujours posé au vu des déviations observées sur la base de la ligne déterminée sur l'ensemble du Niger.

**Graphique 3.4 : La ligne des sols déterminée sur la zone invariante du Niger en 1998**



**Graphique 3.5 : La ligne des sols déterminée sur le mois d'avril 1998 au Niger**



### Conclusion préliminaire

Plusieurs indices ont été proposés pour l'étude de la végétation afin de réduire l'effet sol. Néanmoins selon l'importance du couvert, les différents types d'indices permettent ou pas de minimiser cet effet. Aussi, sur le plan de la sensibilité aux propriétés optiques des sols, les indices comme le NDVI, AVI, ARVI et GEMI peuvent être plus ou moins affectés. Les indices les plus intéressants à ce niveau sont le PVI, le TSAVI et le TSARVI qui décrivent bien les sols indépendamment de leur couleur et de leur brillance et ont aussi montré leur limites dans les végétations denses.

Au niveau de la vigueur de la végétation, le TSAVI maximise le signal issu de la végétation dans les milieux hétérogènes et donne de meilleurs résultats dans l'estimation du couvert végétal. (Purevdorj et al., 1998 ; Bonn, 1998)

En milieu tropical sec, comme c'est le cas au Niger où la végétation est très clairsemée, le problème de l'impact des sols sur les indices perturbe considérablement les applications basées sur la télédétection comme le front de végétation ou l'évaluation des parcours. Les études d'amélioration de cet impact sur la base de ces indices sont souvent restées au niveau expérimental et Bannari et al. (1996) proposent l'application de ces indices sur d'autres échelles. Eu égard aux caractéristiques de la végétation sahélienne, on peut retenir des différentes études que le TSAVI est l'indice le plus performant pour l'estimation de la végétation surtout dans les milieux à couvert faible comme le Niger. Cet indice est étudié dans les parties de l'étude qui suivent, en même temps que le NDVI à travers leur évolution saisonnière et leur calibration avec les données de masse végétale des terroirs du FAKARA.

## 4. ETUDE DES INDICES TSAVI ET NDVI DANS LA ZONE OUEST DU NIGER :

Après la détermination des paramètres du TSAVI et l'examen des paramètres statistiques et des profils des deux indices, leur sensibilité à la couleur et à la brillance des sols a été étudiée. Une classification supervisée par la méthode de la « distance minimum » a été effectuée sur les séries annuelles de TSAVI et du NDVI. Cette classification utilise comme « vérité terrain » les types de sols principaux de la zone ouest du Niger. Cette démarche rentre dans le cadre de la recherche d'une clé d'extrapolation des modèles qui seront issus de l'évaluation de la production végétale.

### 4.1. Méthodes

En rappel, la détermination du TSAVI exige de connaître les paramètres notamment la pente et l'ordonnée à l'origine de la ligne des sols. Sur l'ensemble de la fenêtre du Niger, l'équation obtenue est  $Y=14.23+1.0684x$ . Cette équation est similaire à celle trouvée par Huete et al (1991) dans le désert du Sahara avec une pente de 1.03 et une ordonnée à l'origine de 8. Ces travaux dans le désert du Sahara ont été menés à partir de mesures spectrales de sol. Au Sénégal, Séguis et al. (1994) trouvent une équation similaire avec une pente de 1.166 et une ordonnée à l'origine de 0.205. Cette ordonnée à l'origine dépend du codage des valeurs de réflectance dans le rouge et le proche infra rouge (8 bit, 16 bit, etc.)

Les calculs du TSAVI ont été effectués à l'aide du logiciel Idrisi™ sur l'ensemble de la fenêtre du Niger. La procédure « Windows » a été utilisée pour extraire une fenêtre correspondant à la partie Ouest du Niger sur 0° à 4 ° E de longitude et 12° à 15° N de latitude. Les sites d'études ont été extraits sur la base des couches d'unités géographiques et le fichier village du Niger du Centre Régional Agrhymet par interrogation sous le logiciel ARCVIEW™. Les résultats donnent les 23 villages qui figurent dans le tableau 4.1. Cet échantillon de points représentant les villages est un ensemble stable sur le plan géographique et bien réparti sur les sites du Fakara. L'objectif est de rechercher parmi les deux indices, celui qui discrimine au mieux le couvert végétal et qui rend compte de l'importance de son évolution

**Tableau 4.1. Sites d'étude de l'évolution saisonnière des indices**

code_etude	Code AP3A	NOM de la localité ( IGN)	longitude	Latitude
1	4638	TIGO TEGUI (ABAMATE)	2.776073	13.509500
2	4639	BAGOUA	2.769408	13.497220
3	4640	BANIZOUMBOU	2.660245	13.527750
4	4641	BANKA DEY	2.603281	13.530470
5	4642	BOKOSSAY	2.789361	13.425440
6	4643	BOUNDOU	2.639944	13.544550
7	4644	BOUNDOU WAROU	2.797821	13.564390
8	4647	DEY TEGUI	2.789850	13.450780
9	4648	FALANGA	2.806105	13.425500
10	4655	KALASSI	2.580437	13.529790
11	4660	KO KAINA	2.784559	13.589380
12	4661	KATANGA	2.815333	13.536560
13	4664	KO DEY	2.844070	13.379540
14	4665	KOMA KOUKOU	2.630920	13.502190
15	4666	KORTO	2.691109	13.494590
16	4667	GOROU YENA	2.745280	13.507290
17	4668	MAOUREY KOUARA ZENO	2.650895	13.589200
18	4672	TONDI KIBORO	2.687304	13.516390
19	4673	SAMA DEY	2.704765	13.584560
20	4677	YERIMA DEY	2.688495	13.480640
21	4678	YOULOUA	2.625171	13.536420
22	4691	FANDOU BERI	2.558077	13.533920
23	4787	BOULA GANDATIE	2.809664	13.337930

Source : AP3A 2000

Différentes études sur les indices ont montré la capacité du TSAVI et du NDVI de mieux rendre compte de l'importance du couvert végétal dans les zones à végétation faible (Leeuwen et al., 1994 ; Bannari et al., 1995 ). D'autres travaux par contre posent des problèmes de différenciation de différents couverts végétaux, et limitent la sensibilité du NDVI à des taux de couverture végétale de l'ordre de 20 à 40 % (Leeuwen et al., 1994). Pour le couvert végétal proprement dit, Purevdorj et al. (1998) montrent dans des zones de faible végétation en Asie, à partir de mesures radiométriques, que le TSAVI donne de bonnes précisions dans l'estimation du couvert végétal. Ils trouvent par ailleurs que le NDVI donne aussi une bonne estimation du couvert végétal dans plusieurs situations de densité et proposent une validation de ces assertions sur les images satellitales basse résolution.

Afin de mettre en évidence la sensibilité de ces indices dans les zones semi-arides du Niger, une analyse de l'allure de la courbe au cours de la saison et une comparaison par rapport aux données biophysiques liées aux différentes zones ont été

réalisées. le TSAVI et le NDVI ont fait l'objet de classification automatique par la méthode du classificateur de « distance minimum » afin de trouver une base éventuelle dans l'extrapolation des données de phytomasse totale des sites .

La démarche utilisée va de l'observation simple des paramètres qui composent le TSAVI, c'est à dire les réflectances rouge et proche infra rouge, des paramètres statistiques des indices et enfin une classification supervisée de la zone d'étude.

#### **4.2. Etude de la variation saisonnière et de la sensibilité des indices**

##### **a) Les indices maximum et minimum de la zone**

Ils ont été calculés sur la période allant de la première décade d'Avril à la deuxième décade de décembre 1998. Les valeurs trouvées mettent en évidence la saturation des deux indices par des maxima temporels. Dans cette zone Ouest du Niger, cela est imputable aux zones du parc du W dont la couverture végétale est assez importante tout le long de l'année. L'examen du minima montre par contre de grands écarts temporels au niveau du TSAVI par rapport au NDVI avec une variabilité géographique plus prononcée sur le NDVI que le TSAVI au vu des valeurs d'écart type. La moyenne du NDVI maximal et minimal sont identiques du fait de la dominance des zones à faible indice entre la valeur 30 et 130 sur l'ensemble de la fenêtre de la zone ouest du Niger par rapport aux zones avec des indices élevés.

- **Remarques sur l'utilisation des comptes numériques pour les indices de végétation.**

Dans l'utilisation des données d'indice de végétation, les normes de conversion diffèrent selon les senseurs, le type d'image et l'objectif poursuivi. Aussi, la comparaison devient difficile pour l'utilisateur si des informations complètes ne sont pas fournies sur la méthode de conversion des comptes numériques. Dans notre démarche, il apparaît souvent des comptes numériques ou des valeurs « réelles » de NDVI au sens mathématique. Pour les 3 indices que nous utilisons, en rappel, les formules de conversion utilisées sont les suivantes :

- NDVI végétation :  $0.004 \times CN - 0.1$
- NDVI Agrhymet :  $CN / 127 - 1$

Les images VEGETATION et NOAA-AVHRR du CRA sont en format 8 bit donc codés de 0 à 256. Cet intervalle de 0 à 256 correspond à la gamme de variation de leur compte numérique. Pour le TSAVI, à la fin des calculs, sa valeur est comprise entre -1 et 1. Pour la lecture des fichiers sous WINDISP, les fichiers en mode réel doivent être en mode binaire. La valeur du TSAVI est alors transformée avec une équation qui permet d'avoir des valeurs comprises dans l'intervalle 0 à 256.

**Tableau 4.2. Paramètres statistiques du TSAVI de 1998 au NIGER d'avril à décembre**

Paramètres statistiques	TSAVI MAXIMUM	TSAVI MINIMUM
MINIMUM	- 0.0797	-0.1353
MAXIMUM	0.9203	0.8647
MOYENNE	0.2058	0.1488
ECART TYPE	0.2855	0.2841

**Tableau 4.3. Paramètres statistiques du NDVI de 1998 au NIGER d'avril à décembre**

Paramètres statistiques	NDVI MAXIMUM	NDVI MINIMUM
MINIMUM	0.05	0.04
MAXIMUM	0.7	0.6
MOYENNE	0.3	0.3
ECART TYPE	0.03	0.005

#### **b) l'allure générale des courbes**

L'allure générale des courbes de TSAVI , NDVI de SPOT VEGETATION et NDVI de NOAA AVHRR qui portent sur les 23 villages de la zone du FAKARA (cf. graphique 4.1 à 4.2) montre des courbes classiques de végétation de la zone sahélienne. Le pic de la courbe se situe entre la 2ème décade de Septembre et la 3ème décade de Septembre. Les deux indices montrent ainsi leur sensibilité à l'activité chlorophyllienne de la zone avec des variations temporelles bien marquées. La couverture faible de végétation dans la zone a souvent été considérée à tort comme non sensible à la résolution des satellites basse résolution. Ces courbes confirment qu'il

mondial ou régional). Quoiqu'elle porte sur une année, les tendances observées peuvent servir d'éléments de référence pour les travaux futurs.

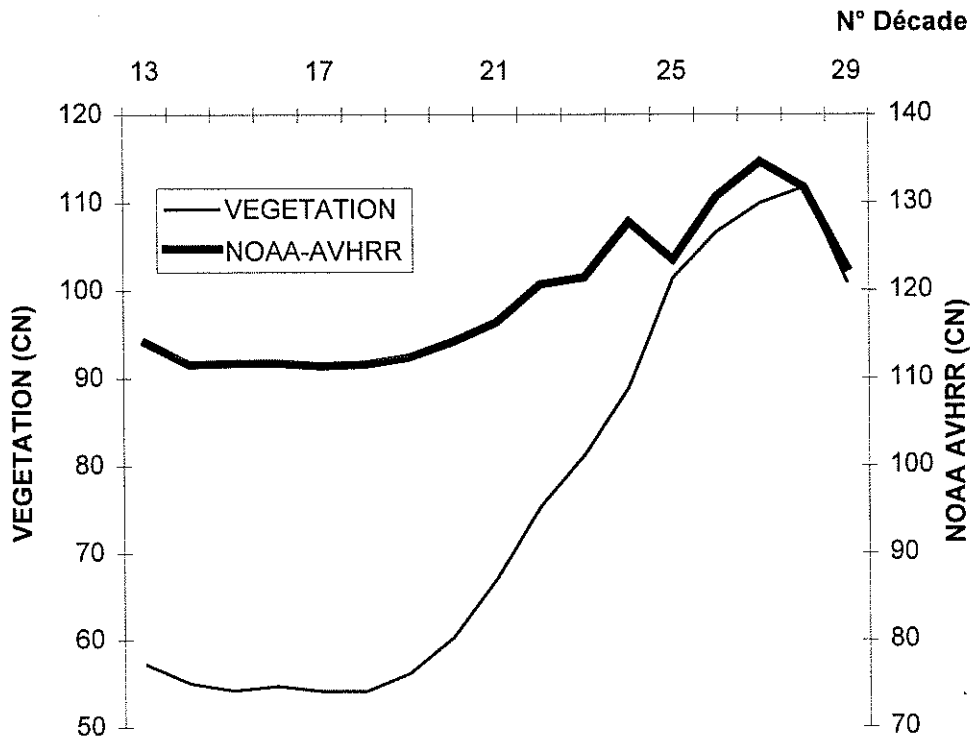
Avant de faire cette comparaison, l'exactitude de la position géographique des points a été vérifiée sur les deux types d'image. Sur les profils saisonniers de NDVI, les variations observées entre les différents sites sont similaires entre VEGETATION et NOAA-AVHRR. Cette indication dénote de la très bonne géoréférentiation des deux types d'image au Niger (Tychon et al., 1999).

L'examen des profils montre que le NDVI produit au CRA est beaucoup moins lissé au cours de la période de croissance qui commence à la première décade de juillet (19ème décade) que le NDVI de VEGETATION (cf. graphique 4.3). Sur le NDVI produit au CRA, des comparaisons ont montré que ces perturbations de la phase de croissance sont liées d'une part à la variabilité du début de la saison mais aussi aux déficits hydriques très courants au cours de cette période. La croissance linéaire indiquée par le NDVI VEGETATION n'est pas conforme à une évolution de la végétation dans cette zone du Sahel. Cette absence d'artefact dans le profil de VEGETATION entre la levée des plantules et la croissance maximale dans la zone d'étude peut être aussi liée à une meilleure correction atmosphérique. Cette question reste toute fois à approfondir avec un échantillon de zones géographiques plus élevé mais aussi une série temporelle d'indice de végétation sur plusieurs années. La question de la sensibilité du NDVI au stress hydrique des plantes au Sahel reste aussi posée. Elle a été abordée par plusieurs auteurs ( Groten, 1991, Hiernaux et al., 1986) mais très peu de confrontations avec les données au sol ont été réalisées.

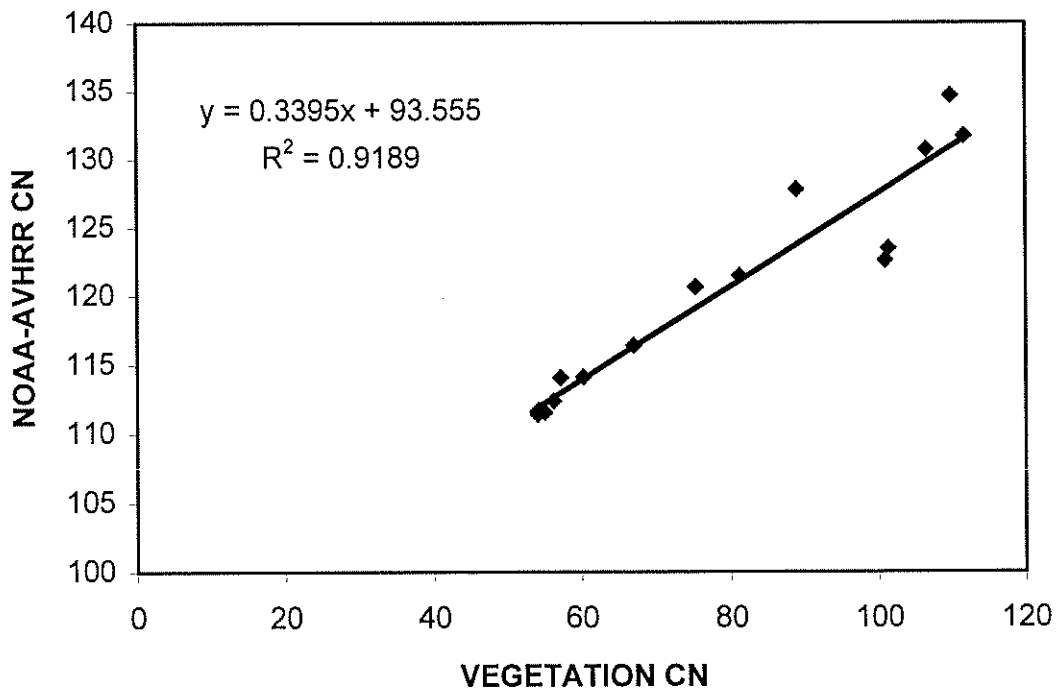
Les données portant sur les satellites basse résolution sont surtout intéressantes quand elles couvrent plusieurs années dans les études environnementales. L'utilisation combinée de NOAA et de VEGETATION peut s'avérer intéressante dans certains cas. Aussi, une recherche de liaison entre le NDVI des deux senseurs a montré une forte relation entre les deux paramètres (le coefficient de détermination  $r^2 = 0.92$ ). Cependant, il faut noter que cette relation reste à vérifier dans des zones à couverture végétale plus dense où la dispersion des valeurs est plus grande sur la courbe (cf. graphique 4.4).



**Graphique 4.3: Profil moyen du NDVI des deux senseurs**



**Graphique 4.4: Relation NDVI Végétation et NOAA-AVHRR**



#### **d) le profil saisonnier des 23 villages de référence**

L'observation du profil saisonnier des 23 villages du FAKARA permet de voir si des différences de comportement sont perceptibles dans cette zone de 20 km de large sur 30 km de long avec les satellites basse résolution. La visualisation des courbes des graphiques 4.1 et 4.2 permet d'observer les différences temporelles. Le problème posé ici est de savoir si les écarts au niveau spatial, c'est à dire entre deux villages sont significatifs et pourquoi ?. Cette question va être abordée de la manière plus simple par une comparaison multiple de moyennes suivant des périodes mensuelles. Le problème posé sera aussi examiné par la suite par des méthodes de classification automatique.

#### Quelques grands traits dans les profils

L'un des grands traits dans les profils apparaît avec quelques villages situés au sud. Cette différence latitudinale est la plus fréquente au Sahel à cause du facteur climatique. Le village de Korto fait une exception à la règle. L'observation des courbes montre que les variations les plus importantes sont celles du village de Kodey situé au sud de la zone d'étude, des villages de Koukou et de Korto situés au Sud de Banizoumbou qui se distinguent respectivement en début de saison et à la phase du maximum des autres courbes. Sur le plan de l'occupation des sols, on note dans Hiernaux (2000) que le site de Kodey a le pourcentage de sols cultivés le plus élevé, de l'ordre de 65%, les sols nus ne dépassant guère 4%. Cette distinction du site de Kodey pourrait s'expliquer par une précocité dans les semis. Quelques artefacts apparaissent au cours de la saison de croissance sur la plupart des villages de la zone notamment entre la 2<sup>ème</sup> décennie de juillet et du mois d'août. Dans le suivi de la campagne, les rapports du centre régional Agrhymet font ressortir cette perturbation de la campagne agricole par des trous de sécheresse dans la première et la deuxième décennie d'août au nord et à l'est du Département de Tillabery (Agrhymet, 1998).

Une analyse statistique complète cette comparaison sur le TSAVI. La méthode d'analyse utilisée est celle de l'analyse de variance à une seule voie afin de faire apparaître la différence entre plusieurs moyennes. Elle a été menée de manière séquentielle en divisant l'année en mois afin de voir les différences entre les villages qui

sont assez bien réparties sur la zone. Cette méthode a été utilisée par Seguis et al. (1994) pour discriminer avec le TSAVI des couverts végétaux du mil d'avec d'autres cultures au Sénégal . Les tableaux d'analyse de variance sont donnés en annexe B.

### Comparaison inter village du TSAVI et du NDVI

Cette comparaison porte sur les 23 villages de la région du Fakara. La méthode utilisée est basée sur le test de l'hypothèse d'égalité des moyennes mensuelles d'indice des différents villages. Les comparaisons mensuelles indiquent des différences significatives entre les sites pour les mois de mai à septembre au seuil de 5% pour les deux indices. L'hypothèse d'égalité n'est pas contredite au cours des mois d'avril, et à partir du mois d'octobre jusqu'en décembre. Sur le TSAVI, pour le mois de juin, les différences observées ne sont pas significatives au seuil de 5%. Cette homogénéité statistique dans le mois de juin n'est cependant pas trop prononcée car la valeur de probabilité est de 7% au lieu de 5%.

Pour l'ensemble des villages, la dispersion des indices est faible en début de saison et en fin de cycle. Le signal en début de saison est celui des sols. En fin de cycle, les récoltes débutent en octobre ou en novembre et le sol est couvert de résidus de récolte avec un pourcentage élevé de sols nus.

L'un des éléments frappants de cette comparaison est la différence marquée entre les sites au mois de mai. Cette différence peut être imputable aux perturbations atmosphériques dans la région et surtout aux pluies précoces. Aussi, la variabilité de la distribution de la pluie fait qu'une zone peut recevoir ses premières pluies de manière précoce et connaître des séquences sèches par la suite (Shivakumar et al., 1993). Les résultats obtenus concordent avec ceux trouvés par Seguis et al. (1994) au Sénégal où TSAVI se révèle comme un meilleur indicateur de l'absence de couvert en début d'hivernage notamment au mois de mai. Il se présente aussi comme un bon discriminant des villages à la période de végétation maximale. Au titre de la comparaison du TSAVI et du NDVI, les deux indices se comportent de manière identique et sont intéressants pour une classification de la zone de Fakara.

### e) la sensibilité des indices autour de la ligne des sols

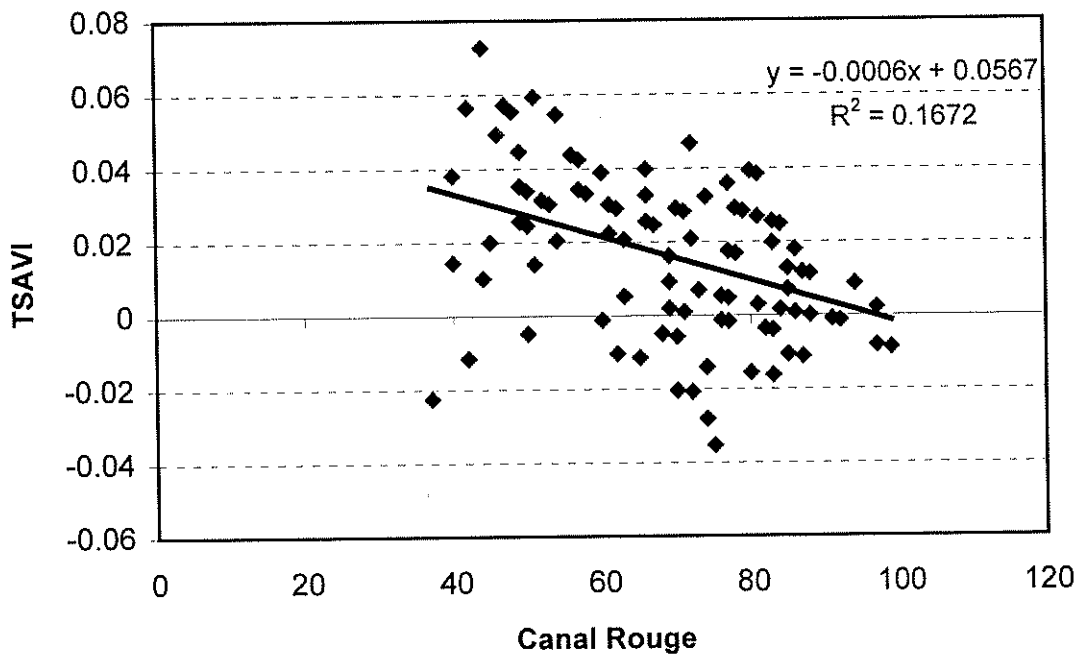
La sensibilité du TSAVI autour de la ligne des sols indique son degré de résistance à une modification due à la couleur et à la brillance des sols (Huete, 1991, Bannari et al., 1996). Dans la pratique, la sensibilité a été évaluée par la méthode graphique dans un espace rouge (canal 2 de Spot VEGETATION) avec le TSAVI et le NDVI. L'hypothèse des sols nus en avril et dans la zone invariante est toujours prise en considération. Cette sensibilité est également comparée à la sensibilité du NDVI.

Pour tester cette sensibilité, un échantillon de 108 points a été extrait des images du canal rouge et de l'indice TSAVI (méthode SAMPLE) dans la zone Ouest du Niger. Deux remarques découlent des nuages de points de dispersion (cf. Graphique 4.5 et 4.6) quand les deux indices sont comparés entre eux :

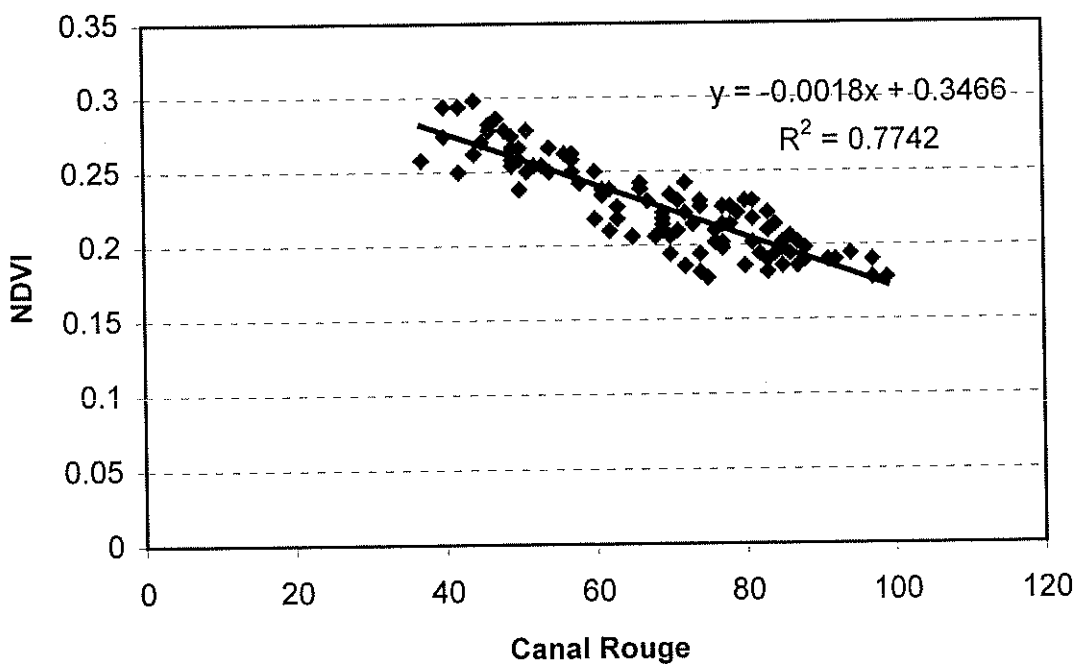
- Le coefficient de variation est plus élevé au niveau de la courbe du TSAVI que celle du NDVI, respectivement 130% et 13%
- Le NDVI a une forte liaison (plus que le TSAVI) avec la couleur des sols confirmée par les droites de régression retenues. Le coefficient de détermination est de 77% contre 17% pour le TSAVI.
- La pente de la droite des indices est plus faible pour le TSAVI ( $6.10^{-4}$ ) comparé à celui du NDVI ( $2.10^{-3}$ )

Ces observations montrent effectivement que le TSAVI est moins influencé par la couleur des sols que le NDVI compte tenu qu'il intègre les paramètres de la ligne de sol. Cependant ces deux courbes posent le problème de la linéarité de la ligne des sols. La trop grande variabilité du TSAVI autour de l'axe des sols (Graphique 4.5) laisse penser aussi à un effet secondaire important. Pour un même type de sol, on obtient plusieurs TSAVI. Plusieurs auteurs montrent en effet que les indices orthogonaux sont affectés par les effets atmosphériques. Dans le cas présent, ces effets seraient moindres eu égard aux corrections faites sur les images VEGETATION. D'autres types de bruits pourraient être à l'origine de ces variations comme ceux cités par Holben et al., (1984), et Hanan et al., (1991) qui sont les interactions entre sol et végétation sur une même surface.

Graphique 4.5: Test de sensibilité du TSAVI aux sols



Graphique:4.6 Test du sensibilité du NDVI aux sols



### 4.3. La Classification de la zone Ouest du Niger

En matière de télédétection, l'information au sol constitue un élément important pour donner un sens réel aux images satellitaires. L'objectif du travail est de rechercher la vérité terrain qui existe à une échelle plus grande que la zone d'étude et qui dispose d'éléments communs avec cette zone. La recherche des signatures spectrales des canaux rouge et proche infra rouge ou les profils d'indice des vérités terrain sont utiles pour la classification.

En dépit de l'existence de deux bases de données géographiques, l'une sur l'échelle de la nation et l'autre sur les terroirs du Fakara, ce premier travail de classification s'est intéressé aux couches existantes sur la nation afin de dégrossir le sujet avant d'aborder dans les études à venir les couches géographiques existantes sur le Fakara. Dans les bases de données sur le Niger, les "vérités terrain" disponibles au Centre Régional Agrhymet sont les suivantes :

la carte des sols au 1/500 000ème sur la partie agricole du Niger,

la carte du potentiel d'utilisation des terres du Niger (Crop Use Intensity) de l'USGS (U.S. geological survey national),

la carte de pluviosité annuelle de l'année 1998 issue d'une interpolation spatiale ou de l'estimation des pluies à partir des données du satellite METEOSAT.

L'objectif de cette classification est de retrouver des traits caractéristiques du paysage de la zone Ouest Niger à partir des images VEGETATION pour les besoins du changement d'échelle avec les caractéristiques de la zone de Fakara. Des zones homogènes issues de cette classification peuvent être utilisées dans les modèles de production primaire pour l'extrapolation des données de production végétale.

Sur la base des "vérités terrain", le choix s'est porté sur la carte des sols car elle constitue une donnée structurelle sur la zone. Les images et la carte du potentiel d'utilisation des terres ne sont pas utilisées pour plusieurs raisons. Elles ont

été conçues par l'USGS pour pallier l'absence de carte d'occupation des sols. L'utilisation faite de ces cartes a été surtout la stratification du NDVI et la redistribution des statistiques agricoles (McGuire, 1997). Ces cartes sont aujourd'hui dépassées car elles proviennent de l'interprétation des images LANDSAT de 1980. Les occupations de sols au Sahel ont beaucoup évolué en 20 ans. Les conclusions sur l'évaluation de ce produit en 1997 recommandent une vérification de ces cartes dans une approche quantitative de stratification du NDVI et l'utilisation d'autres sources de données combinées.

Les cartes de pluviosité annuelle n'ont pas été retenues car elles sont très corrélées avec le NDVI. Une telle variable pose le problème de colinéarité dans une classification et n'apporte pas d'information supplémentaire,

La démarche qui sera utilisée consiste pour chaque type de sol, à identifier ses caractéristiques statistiques, son profil et d'effectuer des comparaisons sur plusieurs périodes. Les deux indices principaux, le NDVI et le TSAVI seront utilisés et comparés, de même que les canaux rouge et proche infra rouge. Cette approche simplifiée du problème des classifications devra permettre d'identifier dans les signatures spectrales des types de sols et au cours de la saison, les périodes qui peuvent être utilisées dans une classification de la zone. Cette approche est recommandée dans Bartholomé (2000) car ces périodes correspondent à des phases phénologiques propres à chaque espèce ou chaque unité végétale.

L'approche qui consiste à utiliser la signature spectrale des sols provient du fait que le type de végétation peut s'associer étroitement au type de sol (Bartholomé, 2000). Dans ce cas, le zonage peut être obtenu sur une image présentant le moins de végétation possible. Aussi, après une approche simplifiée de classification de la zone, une classification supervisée avec la méthode de la "distance minimum" est réalisée sur la zone Ouest du Niger. Une présentation des types de sols est faite en premier lieu pour donner une idée précise de la « vérité terrain » qui est utilisée.

## **a) les types de sols**

La couche numérique des sols du Niger est issue des cartes de reconnaissance pédologique du Niger à l'échelle 1/ 500 000. La carte 4.1 ne présente que l'extrait des sols sur lesquels le présent travail porte. Une carte d'aptitude de ces sols est donnée sur le même graphique car la variable aptitude est fournie dans la base de données existante et peut être intéressante dans une classification. Cependant, cette carte est très mal documentée à l'image de plusieurs bases de données géographiques existantes au Sahel. La méthode utilisée pour transformer les classes de sols en aptitude n'est pas décrite. Ceci limite considérablement l'utilisation de certaines bases de données géographiques qui contiennent pourtant plusieurs fonds géographiques.

Sur la base de la carte de la zone d'étude et de cette carte des sols, 5 types de sols dominants ont été retenus. Ces sols sont ceux présents sur la zone d'étude du Fakara. Dans la légende de la carte, ces 5 unités correspondent à la dénomination suivante :

### *Les Sols de type 16*

Sols peu évolués non climatiques et d'érosion, sols régiques, faciès ferrugineux, famille sur placage sablo-argileux sur dalle localement ferrugineuse.

### *Les sols de type 53*

Sols à sesquioxydes fortement individualisés et à humus rapidement décomposés, sols ferrugineux tropicaux, non ou peu lessivés (en argile), sols ferrugineux peu lessivés (lessivés en fer), évolués, toposéquence des vallées

### *Les sols de type 51*

Sols à sesquioxydes fortement individualisés et à humus rapidement décomposés, sols ferrugineux tropicaux, non ou peu lessivés (en argile), sols ferrugineux peu lessivés (lessivés en fer), évolués sur formation sableuse du moyen Niger , série de Tantchia.



### *Les sols de type 52*

Sols à sesquioxydes fortement individualisés et à humus rapidement décomposés, sols ferrugineux tropicaux, non ou peu lessivés (en argile) sols ferrugineux peu lessivés (lessivés en fer), évolués en séries très rubéfiées de plateau.

### *Les sols de type 2*

Sols minéraux bruts, sols minéraux bruts non climatiques; sols minéraux bruts d'érosion , lithosols et régosols, famille sur grès ferrugineux et grès argileux.

Sur l'ensemble de la partie agricole du Niger , les sols de type 16, 51, 53 représentent chacun un peu plus de 10 000 km<sup>2</sup> et les sols de type 2 et 52 , un peu plus de 6000 km<sup>2</sup> (cf. tableau 4.4). Parmi les 178 classes de sols de la carte ORSTOM, ces sols représentent à eux seuls 19% de la partie agricole du Niger.

**Tableau 4.4. Les sols du Niger dans la région du Fakara**

Type de sol	Superficie (km <sup>2</sup> )	Proportio
2	6278.6	2.4
16	12574.1	4.7
51	13369.3	5.0
52	7724.3	2.9
53	10117.1	3.8
<b>Total agricole</b>	<b>266500.2</b>	<b>18.8</b>

Le pourcentage est calculé par rapport à l'ensemble de la zone agricole du NIGER.

### **b) Les indices des différents types de sols**

Les deux indices de végétation se caractérisent essentiellement par leur aptitude à mettre en évidence la présence d'activité chlorophyllienne malgré l'influence des sols. Les indices ont été caractérisés par leur statistique descriptive (minimum, maximum, moyenne, somme, écart type ) qui figurent en tableau 4.5. Les courbes d'évolution ou profils temporels figurent dans les graphiques 4.7 et 4.8.

L'examen de ces statistiques qui figurent dans les tableaux 4.5 et 4.6 indique une nette différence du type 51 aussi bien pour le NDVI et le TSAVI. La différence

temporelle au niveau du TSAVI est aussi plus prononcée avec une distribution de type égalitaire entre la moyenne et l'écart type.

**Tableau 4.5 et 4.6 : Statistiques descriptives des deux indices par type de sol de la zone du FAKARA en 1998 d'avril à décembre**

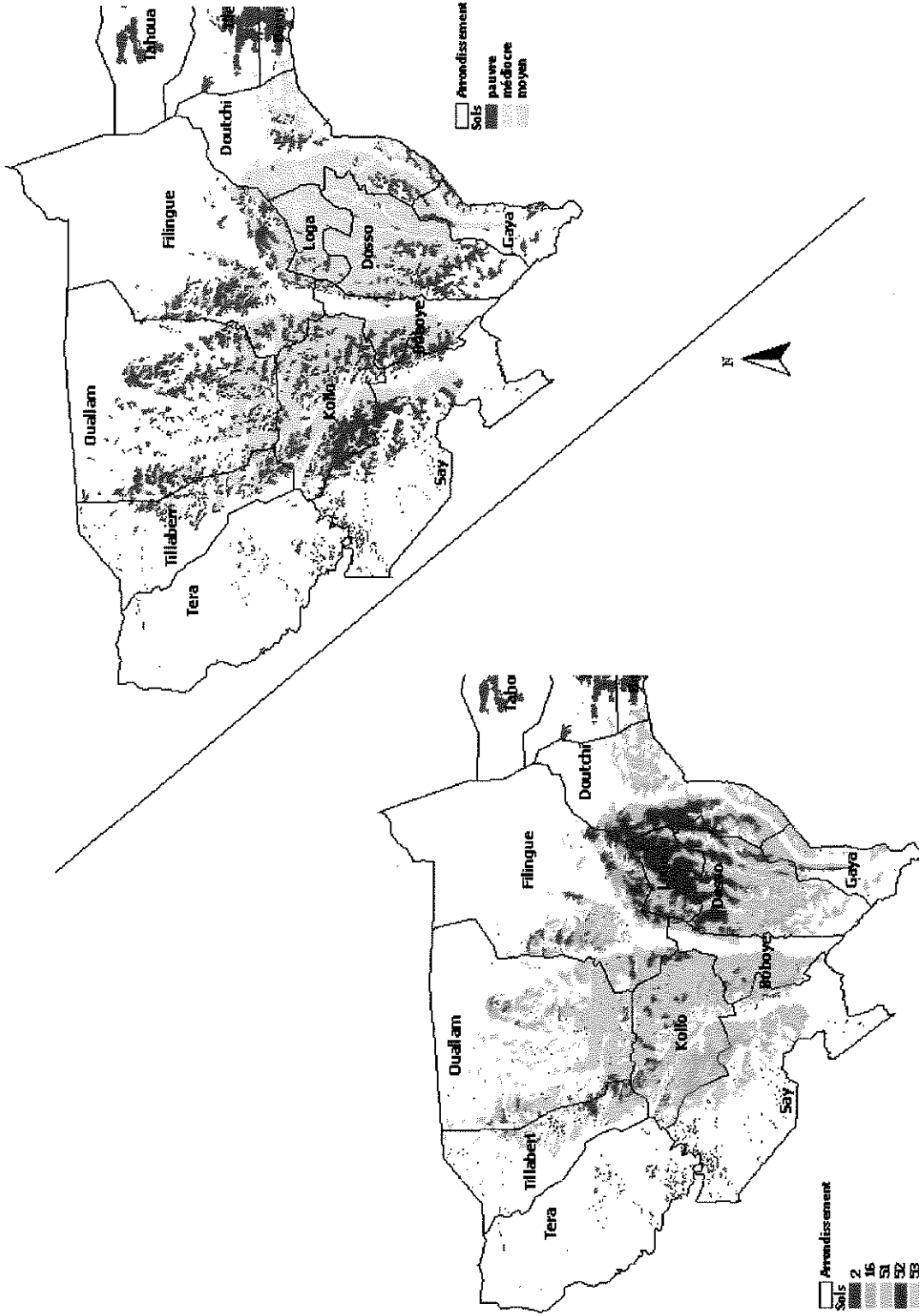
	Sol 2	Sol 16	Sol 51	Sol 52	Sol 53
<b>NDVI</b>					
Minimum	0.11	0.12	0.13	0.12	0.11
Maximum	0.28	0.29	0.36	0.33	0.30
Moyenne	0.17	0.19	0.22	0.20	0.18
Somme	7.02	7.38	8.20	7.56	7.22
Ecart type	0.04	0.04	0.02	0.03	0.04

	Sol 2	Sol 16	Sol 51	Sol 52	Sol 53
<b>TSAVI</b>					
Minimum	-0.01	-0.01	0.01	0.00	-0.01
Maximum	0.22	0.19	0.29	0.24	0.21
Moyenne	0.08	0.08	0.13	0.09	0.08
Somme	2.20	1.96	3.35	2.32	1.95
Ecart type	0.08	0.06	0.09	0.08	0.07

Pour le NDVI, les différences dans les profils temporels se situent surtout au niveau des mois de végétation, à savoir juillet, août, septembre. ( cf. graphique 4.7). Dans le cas présent, les différences dans le profil temporel restent surtout marquées entre les sols de types 51 et 52 d'avec les deux autres. Pour les 5 types de sols, l'analyse statistique ne montre pas de différence significative globalement. Cependant, on note des différences mensuelles décadaires assez significatives à partir du mois de mai jusqu'en juillet et le mois de septembre et novembre.

Pour le TSAVI, les différences sont plus prononcées sauf en octobre et décembre (graphique 4.8). Les tests statistiques sont tous significatifs (probabilité < 5%) du mois d'avril à septembre, et en novembre.

CARTE 4.1: Les sols du Niger présents dans le FAKARA : Types de sols et aptitude agricole



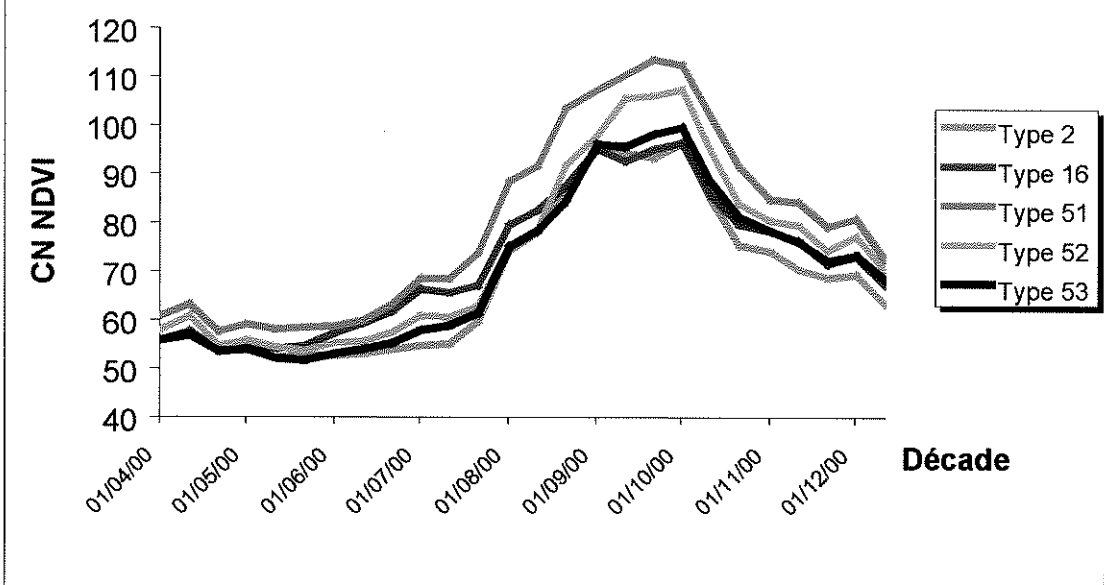
Les sols de type 51 sont des sols sableux les plus cultivés dans la région , entre 30% et 50% de potentiel d'utilisation. Ce sont les sols situés à proximité des bas fonds des dallols. Aussi, leur mise en évidence par le NDVI et le TSAVI et pendant les périodes indiquées montrent que les profils sont ceux des champs pour la plupart cultivés en mil. La classification de ces sols selon leur caractéristiques hydriques montre que ces sols se situent dans la catégorie des sols moyens au Niger (cf. carte 4.2) et parmi les meilleurs des 5 types considérés.

Les sols de type de 52 et 53 sont aussi des sols de type sableux mais avec une faible potentialité d'utilisation, entre 5 à 30%.

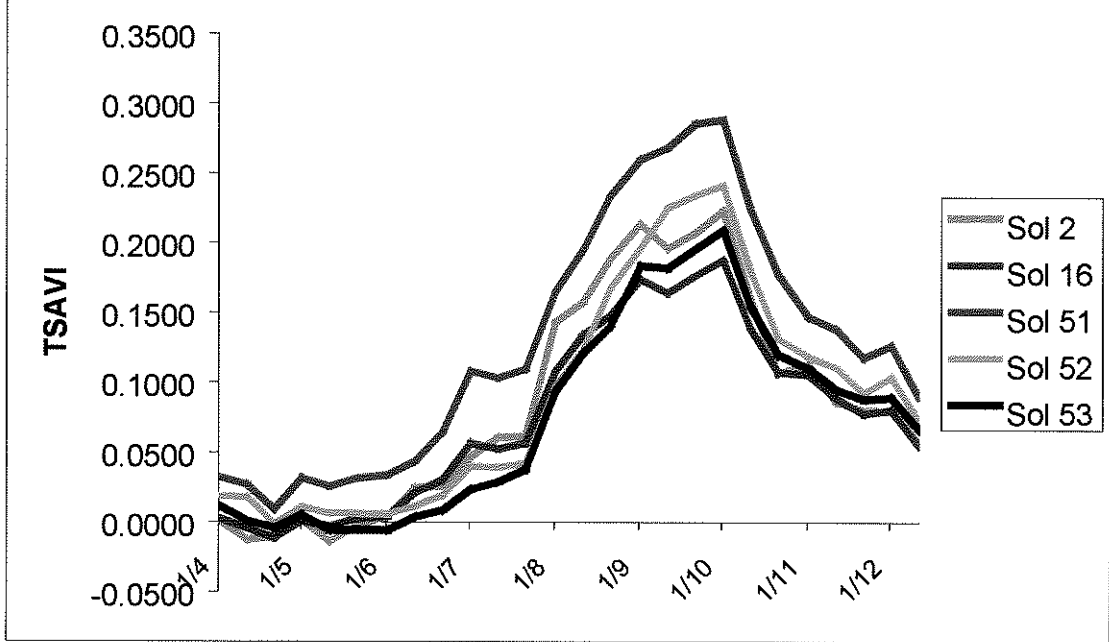
Les sols de type 2 ne sont presque pas cultivés et sont très rares dans la zone d'étude.

Les deux types d'indice arrivent effectivement à discriminer au niveau des périodes de végétation et de l'aptitude des sols. La classification basée sur les potentialités hydriques est simulée mais on peut constater que le sol 51, qui est bien différencié, se trouve plus répandu dans des zones climatiques plus favorables sur le plan de la pluviosité annuelle mais représentent aussi sur la carte, les sols situés dans les dallols . Ces résultats confirment que les deux indices donnent une idée de l'importance de la végétation et permettent une nette discrimination des différents types de sols selon leur aptitude. Pour les zones hydromorphes qui sont bien différenciées, elles sont cultivées ou buissonnantes avec des taux de recouvrement de l'ordre de 50 à 70% (Lebel, 1995)

**Graphique 4.7: Profil NDVI des 5 types de sols**



**Graphique 4.8: Profil TSAVI des 5 types de sols**



### c) analyse des canaux rouge et proche infra rouge

Les images des différents canaux (rouge et infra rouge) ont été analysées sur la base des profils temporels moyens des différents types de sols (cf. graphique 4.9 et 4.10).

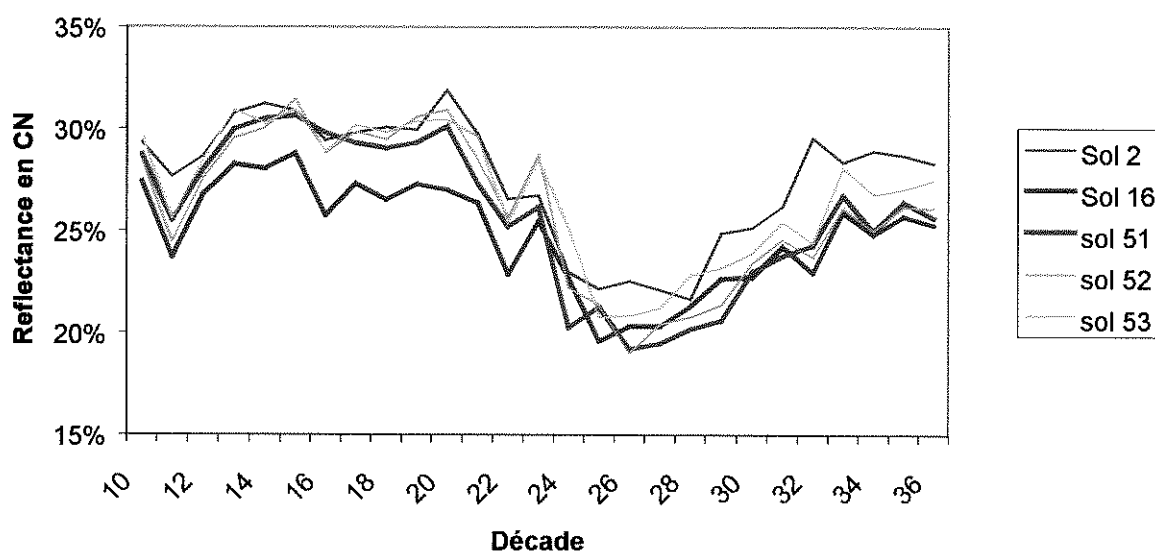
Les canaux du rouge et de l'infra rouge se caractérisent respectivement par la mise en exergue de l'absorption chlorophyllienne des pigments et la réflectance des plantes. Afin de différencier les différents types de sol, la même procédure d'analyse des séries temporelles a été appliquée au rouge et au proche infrarouge. Au delà du comportement général du spectre dans le canal rouge, le sol 16 se différencie nettement des autres en début de saison hivernale dans le rouge et au cours de toute la saison dans le canal infra rouge. Ce sol se caractérise par une réflectance inférieure à celui des autres types sols dans le rouge. Il se comporte par rapport aux autres comme un sol qui absorbe peu et qui reflète aussi peu. Ces sols sont les plateaux à brousse tigrée où il n'existe pratiquement pas de cultures quoique ces dernières années, on observe une tendance à leur mise en culture et leur utilisation abusive pour du bois. Ce type de végétation se caractérise essentiellement par une alternance de sols et de bandes de végétation perpendiculaires à la pente (Hiernaux,1999). La végétation présente est composée essentiellement de combrétacées dans la zone d'étude et le couvert végétal varie entre 20 et 30%. Les zones à gravillons et un tapis herbacé dominé par *Zornia glochidiata* occupe le reste des surfaces.

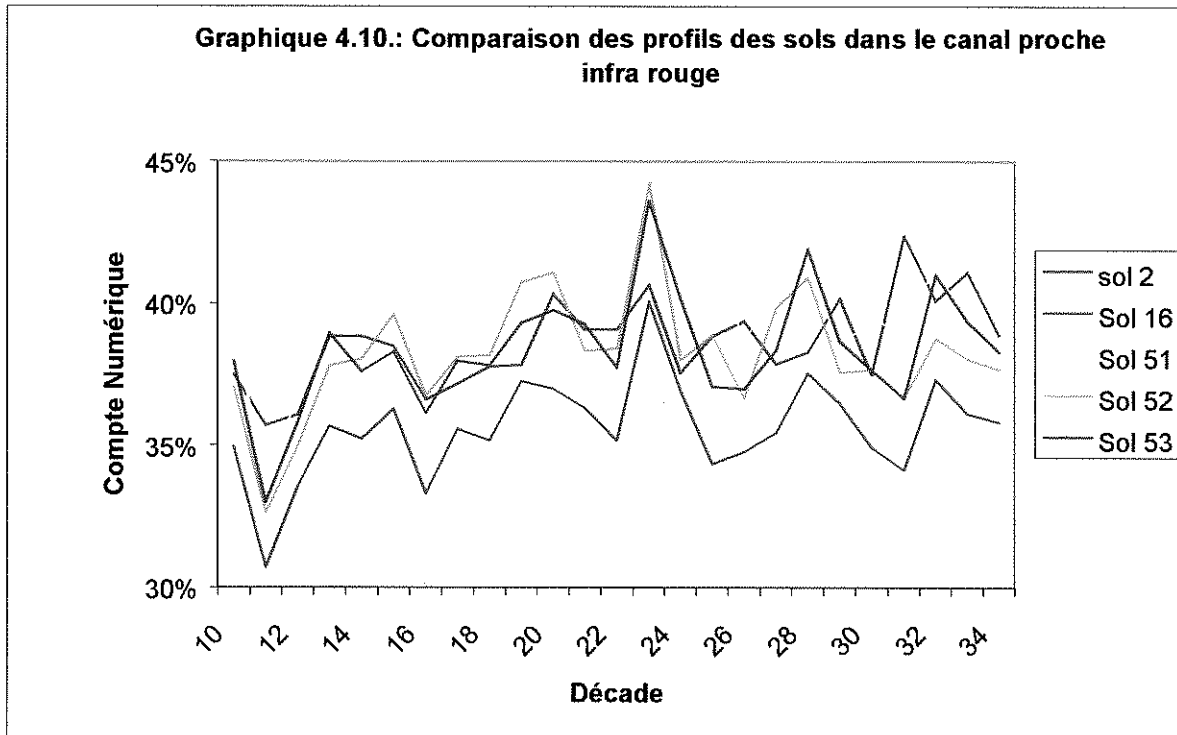
L'examen des profils dans les canaux montre une variabilité plus forte dans le rouge. Ceci permet effectivement de mieux différencier les zones à faible productivité comme les sols de type 16. Le profil de l'infra rouge permet aussi de distinguer ces cas de figure mais reste peut fluctuant au cours de l'année.

**Tableau 4.7. :Statistiques descriptives des réflectances dans le rouge et le proche infra rouge des différents types de sols**

	Sol 2	Sol 16	sol 51	sol 52	sol 53
<b>Infra rouge</b>					
Minimum	36%	31%	35%	33%	33%
Maximum	42%	40%	45%	44%	44%
Moyenne	39%	36%	40%	38%	38%
ecart type	2%	2%	2%	2%	2%
<b>Rouge</b>					
Minimum	22%	20%	19%	19%	21%
Maximum	32%	29%	31%	32%	31%
Moyenne	28%	25%	26%	26%	27%
ecart type	3%	3%	4%	4%	3%

**Graphique 4.9.: Comparaison des profils des sols dans le canal rouge**





En référence aux deux types d'approche, les résultats permettent de distinguer les types de sols dans la zone d'étude :

- Les sols de type 51 et 52 pendant les périodes végétatives par les indices de végétation
- Les sols de type 16 et 2 par l'analyse des réflectances du rouge et du proche infra rouge

Les approches utilisées mettent en évidence aussi, que les indices de végétation et les réflectances des sols sont la combinaison des potentialités des sols mais aussi de leur occupation. Pour la suite de l'étude, une classification supervisée a été réalisée en prenant les types de sols comme "vérité terrain".

#### **d) la classification supervisée de la zone d'étude**

La classification des images satellitales et en particulier celles des images basse résolution a permis de caractériser l'environnement des zones arides et semi-arides soit en identifiant les types de végétation et dans certains cas l'occupation des sols.



Parmi les techniques utilisées, on distingue deux grands types de classification des images. La classification supervisée et non supervisée.

La classification supervisée s'effectue à l'aide d'une « vérité terrain » (carte, données, etc.). Cette connaissance à priori permet la classification de l'image. La classification non supervisée s'effectue sans vérité terrain. Dans les deux cas, des procédures de contrôle sont utilisées pour valider les résultats.

Des algorithmes sont utilisés pour segmenter l'image en classe. Avec le développement des outils informatiques, plusieurs algorithmes de traitement ont été implémentés sur ordinateur allant des systèmes d'analyse en composantes aux classifications par systèmes neuronaux (Bartholomé, 2000). Les résultats obtenus ont été souvent concluants dans les zonages agro-écologiques mais d'autres sont restés très souvent contrastés et n'amènent pas d'information supplémentaire à l'existant. Plusieurs essais de classification des images NDVI n'ont pas donné plus d'information que les cartes de pluviosité annuelle. De même, les classifications faites sur la base des indices ont souvent montré leur limite car les discriminations constatées ne permettent que d'appréhender les zones d'intense végétation.

Dans la présente étude, une méthode de classification supervisée est utilisée sur le TSAVI et le NDVI de SPOT VEGETATION en utilisant les 5 types de sols comme "vérité terrain".

La classification supervisée utilise les profils des unités distinctes de la vérité terrain pour classer une image. Ces profils correspondent à ceux définis dans le point b. du chapitre 4.3 (cf. Graphique 4.7 et 4.8).

Pour la présente étude, le classificateur de "distance minimum" a été utilisé. Comme donnée d'entrée, cette classification a besoin de 7 bandes ou images sous le logiciel IDRISI. Pour ce faire, les maxima mensuels ont été calculés de mai à novembre pour constituer les données d'entrée. Un essai avec les données de la 3<sup>ème</sup> décennie de chaque mois a donné les mêmes résultats. La signature des différents types de sols utilisés a été refaite sur la base du maxima mensuel.

Ce classificateur attribue le pixel à classer à la classe dont la moyenne des intensités des bandes est la plus proche en distance cartésienne de celle du pixel à

classifier. Le logiciel IDRISI appelle chaque image, une bande. Les intensités sont "standardisées" de façon à ce que leur variance soient égales pour le classificateur. Ainsi, une bande n'a pas une influence qui est seulement due à sa plus grande variabilité. Quoique ce classificateur ne soit pas aussi efficace en théorie et en pratique que d'autres, comme le classificateur de vraisemblance maximum, il a l'avantage d'être rapide et aussi de posséder une matrice de confusion plus stable dans l'ensemble de l'image. Cela est dû au fait qu'il dépend de peu de paramètres (la matrice de covariance n'a pas à être estimée) et que l'hypothèse de normalité pour la distribution des signatures dans chaque classe n'est pas invoquée. Ce sont des propriétés désirables pour le correcteur qui est moins sensible aux probabilités plus ou moins importantes d'erreur qu'aux inconsistances de la matrice de confusion d'une partie de l'image à l'autre (Fortier et al, 1991). Cette méthode est utilisée souvent dans les cas où le nombre de pixels qui a servi à créer les profils des vérités terrain est faible (Clark Labs, 1997). Dans certains cas, la proximité des pixels se calcule sur la base d'un écart type spécifié par l'utilisateur. (Research systems, 1999).

Plusieurs outils permettent de vérifier les classifications sous le logiciel IDRISI. Il s'agit des modules CROSTTAB et ERRMAT. Ces deux modules comparent l'image qui représente la "vérité terrain" et l'image qui représente le résultat de la classification. Le résultat est un tableau croisé ou une matrice d'erreur qui donne pour chaque classe le nombre de pixels bien classé. La différence entre les deux modules réside dans le fait que ERRMAT ne prend pas en compte les pixels codés zéro (0). Le résultat donne ainsi la vraie valeur de la précision de classement. Dans le module CROSSTAB, ceci n'est pas pris en compte et comme les pixels codés 0 sont les mêmes dans les deux images (si un masque est appliqué sur la classification pour ne prendre en compte que les sols concernés), ils sont considérés comme bien classés. Le taux de réussite de la classification est alors exagéré. L'appréciation de la qualité des classifications se fait à partir de l'indice KAPPA (KIA : Kappa Index of Agreement). Le coefficient Kappa est un estimateur de qualité qui tient compte des erreurs en lignes et en colonnes. Il varie de 0 à 1. Sa formule est la suivante :

$$Kappa = \frac{\left| N \sum_{i=1}^l x_{ii} - \sum_{i=1}^l (x_{i+} \times x_{+i}) \right|}{\left[ N^2 - \sum_{i=1}^l (x_{i+} \times x_{+i}) \right]}$$

ou  $l$  : nombre de lignes et  $N$  : nombre total d'observations

Kappa s'applique à un échantillonnage au hasard pour une comparaison de pixels. Tous les pixels de la zone de travail ont été utilisés. Kappa exprime la réduction proportionnelle de l'erreur obtenue par une classification, comparée à l'erreur obtenue par une classification complètement au hasard.

Après avoir procédé à la classification selon le classificateur de distance minimum, une matrice de confusion a été construite en comparant les résultats à la classification "idéale" fournie qui est celle de la carte des sols. Le tableau 4.8 donne les résultats de cette matrice.

Ce tableau donne deux types d'erreur :

- L'erreur d'omission = rejet de pixels dans la classification alors qu'il appartient à la classe
- L'erreur de commission = inclusion de pixels dans la classification alors qu'il n'appartient pas à cette classe d'après la vérité terrain,

et le coefficient Kappa pour chaque catégorie de classe ainsi que pour l'ensemble des classes.

#### La classification du NDVI (cf. carte 4.2)

Les résultats obtenus indiquent que le classificateur est particulièrement faible pour les classes de sols 2 et 16 (plus de 90% d'omission). Des taux d'omission moindres sont observés pour les types de sols de type 51 et 53 (environ 40%). Au total le taux de réussite est de 36% correspondant à la proportion de pixels correctement classifiée. Les coefficients de Kappa donnent les mêmes tendances que les erreurs d'omission et de commission. Le coefficient global est de 0.18. Plus  $K$  est élevé et s'approche de 1, plus les pixels sont bien classés.

Ces résultats confirment de manière quantifiée les différences observées sur les profils saisonniers de NDVI. Une reclassification sur la base de ces résultats augmente le taux de réussite. L'objectif de notre travail se porte surtout sur les 5 types de sols. Par conséquent, le regroupement n'a pas été jugé utile.

Tableau 4.8 : Matrice de confusion de la classification supervisée du NDVI

SOL /classe	2	16	51	52	53	Total	erreur de commission
2	103	941	919	393	580	2936	0.9649
16	68	815	218	86	512	1699	0.5203
51	407	3666	4752	2369	1772	12966	0.6335
52	40	307	1233	2212	1213	5005	0.558
53	476	6745	818	2897	6465	17401	0.6285
Total	1094	12474	7940	7957	10542	40007	
Erreur omission	0.9059	0.9347	0.4015	0.722	0.3867		0.6414

Tableau 4.9 : Indice de Kappa de la classification supervisée du NDVI

sols	1	2
2	0.008	0.022
16	0.244	0.0239
51	0.2096	0.406
52	0.3034	0.1748
53	0.1467	0.3156

Signification des colonnes :

1. Elle représente l'indice de Kappa selon que l'image NDVI classée est considérée comme l'image de référence.
2. Elle représente l'indice de Kappa selon que les types de sols sont considérés comme l'image de référence

#### La classification du TSAVI (cf. carte 4.3)

La même méthode appliquée au TSAVI donne des résultats meilleurs que ceux obtenus par le NDVI. Le taux de réussite de la classification est de 46%. Le classificateur est sévère pour les sols de type 2. Les autres types de sols ont des taux d'omission compris entre 67% pour le type de sol 52 et 36% pour le type de sol 51 (cf. Tableau 4.10). Le coefficient de Kappa global est de 0.29 supérieur à celui obtenu dans le cas du NDVI qui est de 0.18. Les plus grandes différences entre le NDVI et le TSAVI se trouvent au niveau des sols de type 16 et 53. Ces deux types de sol se caractérisent par des niveaux de végétation faibles par rapport aux autres. Dans la classification supervisée, ces sols sont mieux classés avec le TSAVI par rapport au NDVI. Dans cet exemple, le TSAVI se révèle comme un indice des zones à faible végétation.

Tableau 4.10 : Matrice de confusion de la classification supervisée du TSAVI

SOL /classe	2	16	51	52	53	Total	erreur de commission
2	132	495	453	228	386	1694	0.9221
16	359	5381	226	1023	1730	8719	0.3828
51	355	3595	5077	2265	1884	13176	0.6147
52	63	679	1590	2629	1520	6481	0.5944
53	185	2324	594	1812	5022	9937	0.4946
Total	1094	12474	7940	7957	10542	40007	
Erreur omission	0.8793	0.5686	0.3606	0.6696	0.5236		0.5441

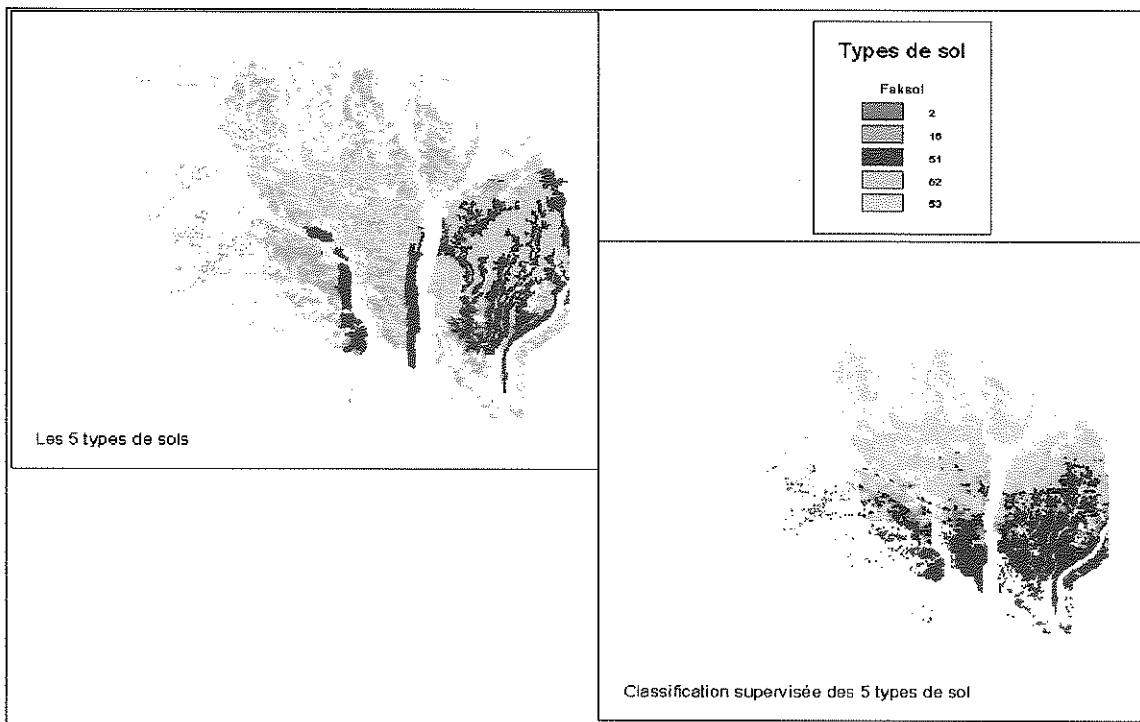
Tableau 4.11 : Indice de Kappa de la classification supervisée du TSAVI

Sols	1	2
2	0.0520	0.0818
16	0.4437	0.2729
51	0.2331	0.4623
52	0.2581	0.2010
53	0.3284	0.3033

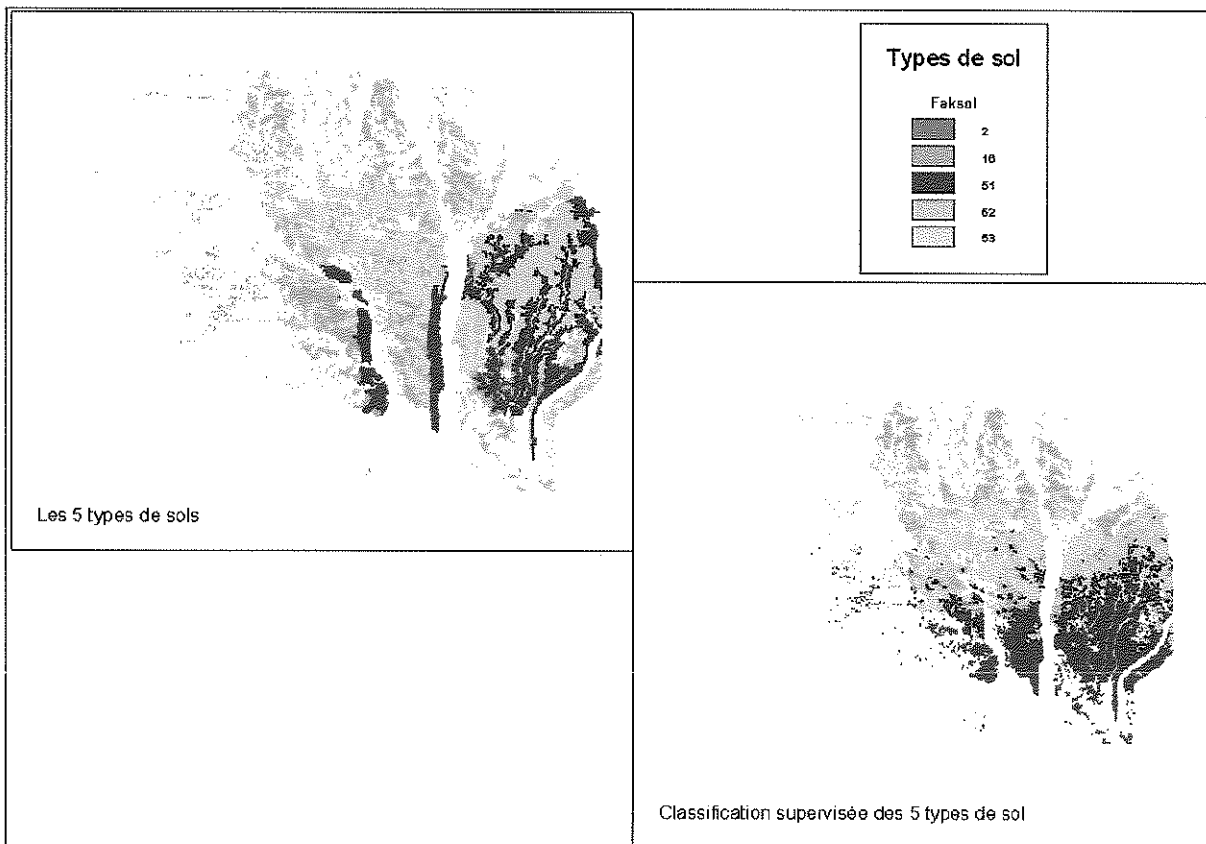
Signification des colonnes :

- 1.Elle représente l'indice de Kappa selon que l'image TSAVI classée est considérée comme l'image de référence.
- 2.Elle représente l'indice de Kappa selon que les types de sols sont considérés comme l'image de référence

**CARTE 4.2 : Classification supervisée du NDVI**



**Carte 4.3 : Classification supervisée du TSAVI**



## Conclusion partielle

Dans cette partie, trois aspects ont été approchés à savoir la sensibilité des indices à la couleur et à la brillance des sols, l'évolution saisonnière des indices et la capacité discriminante des indices dans une classification supervisée.

La sensibilité des indices, à défaut de mesures du couvert végétal a été évaluée sur la base de l'effet de la couleur et de la brillance des sols nus. En pratique, ce degré de sensibilité est évalué par la distance du nuage de points dans un espace rouge vs indice végétation . Dans cet espace, la ligne 0 représente la ligne des sols nus. Les résultats obtenus montrent une meilleure concentration du TSAVI autour de cette ligne. Cette étude révèle néanmoins une plus grande variabilité des deux indices autour de la ligne des sols par rapport aux résultats obtenus par expérimentation . Ces écarts expriment dans la plupart des cas l'importance des effets atmosphériques. Aussi, à la différence des expérimentations au sol où le signal ne traverse pas l'atmosphère dans son trajet retour terre-capteur, les indices de végétation calculés à partir des canaux des senseurs de satellite basse résolution sont beaucoup influencés par ces effets.

La comparaison de l'évolution saisonnière des deux indices TSAVI ne permet pas de les différencier car elles sont toutes sensibles à la croissance des végétaux au cours de la saison. Les deux indices indiquent des maxima à la même période qui pourrait indiquer pour cette région une très forte liaison entre le couvert et la biomasse. Dans la variabilité spatiale, le TSAVI se montre par contre comme un bon discriminant des sites dans les périodes d'intense végétation plus que le NDVI .

Une comparaison du NDVI NOAA et SPOT VEGETATION indiquent qu'il existe une forte liaison entre les deux dans les basses valeurs. Dans les hautes valeurs, on note une forte variabilité de réponse dans les deux senseurs sur certaines zones. Ceci est surtout lié au seuillage du NDVI dans la gamme totale de variation existante. Au cours du démarrage de la saison, les fortes fluctuations de pluviosité courantes au Sahel ne sont pas visibles sur les courbes issues des images SPOT-VEGETATION .

Une classification supervisée du NDVI et du TSAVI pour une reconnaissance des types de sols a montré que les deux indices permettent de discriminer certains types de sols. Le TSAVI est plus performant car il permet de distinguer mieux les types de sols que le NDVI dans une classification supervisée. Le taux de réussite de la classification par le TSAVI est supérieure de 10 % à celui réalisé par le NDVI.

Un essai de classification non supervisée a été tentée dans cette étude mais les résultats n'ont pas été concluants. La méthode qui a été utilisé est celles des composantes principales avec une classification non hiérarchique par le logiciel ADDAPIX (Griguolo, 1994). Cette méthode comporte certaines limites car elle est non supervisée et ne fait pas intervenir une base biophysique. Les résultats obtenus sont purement mathématiques. Aussi, une attention particulière doit être accordée au nombre de classes. Dans la théorie des classifications qui utilisent l'analyse en composantes principales, un nombre de classe réduit comme dans le cas présent, donne des résultats concis et les différences entre les classes sont faciles à interpréter. En revanche, un nombre de classes élevé permet de cerner tous les détails existants mais les résultats peuvent s'éloigner de la réalité du terrain. Aussi, un compromis doit être recherché entre les deux. La limite de ce compromis peut être très subjective. C'est pourquoi, dans la présente, le choix s'est porté sur une classification supervisée.



## 5. L'ÉVALUATION DE LA PHYTOMASSE HERBACÉE

### 5.1 Etat de l'art dans les pays du Sahel

Au Sahel, il faut convenir avec Bartholomé (1994) que malgré les recherches en cours dans le domaine de la télédétection, le suivi des productions agricoles (au sens large) par la télédétection reste secondaire par rapport aux méthodes traditionnelles. Les pays du CILSS ayant utilisé le NDVI dans l'évaluation des ressources fourragères sont le Sénégal, le Mali, le Burkina Faso, le Niger et le Tchad. À l'exception du Mali, dont les travaux avaient un but de recherche, la démarche dans les autres pays visait à produire de l'information au niveau national, orientée vers l'alerte précoce (Niger) ou la compréhension des phénomènes de la désertification (Sénégal). Les informations produites devaient aider les décideurs et les techniciens dans l'évaluation des productions animales. Le produit final dans tous les cas est la carte de la biomasse végétale au niveau du pays ou des cartes d'évolution de la biomasse aérienne végétale au cours de la période de croissance.

Pour ces différents pays, seul le Sénégal dispose de station de réception et de chaîne de traitement des données satellitaires brutes. Les autres pays sont liés au Centre Régional Agrhymet pour les images de synthèse décadaire NDVI.

La méthodologie, de manière générale, consiste à des mesures de la végétation effectuées au sol afin de déterminer la biomasse herbacée et/ou ligneuse. Ces données sont ensuite introduites dans un modèle statistique de production faisant appel à la régression linéaire ou curvilinéaire ayant comme seconde variable le NDVI. La généralisation sur le territoire entier passe par un modèle spatial basé sur les systèmes d'information géographique (S.I.G) en vue de la production de la carte de biomasse. Les méthodes de mesure au sol diffèrent dans les différents pays. La fiabilité des résultats dépend aussi des problèmes d'échantillonnage (taille et nombre de sites, stratification). Pour illustrer ces problèmes de mesure au sol, il ressort des études de Wagenaar et al. (1987) au Niger, que des différences considérables peuvent être observées sur différentes équipes de terrain. En effet, de leur analyse de variance, 34.8% de la variabilité entre les données s'expliquaient par la différence entre les deux équipes. D'autres études menées au Burkina Faso

montrent que des écarts considérables sont dus à un mauvais choix du matériel de pesée (Carrière et al , 1995). En dépit de ces insuffisances qui peuvent être résolues par une application rigoureuse des méthodes statistiques et un contrôle rigoureux des travaux de collecte, plusieurs autres problèmes majeurs ont été relevés dans l'utilisation du NDVI pour l'évaluation des ressources fourragères. Ces problèmes se situent essentiellement dans les deux étapes de modélisation que sont la prise en compte des paramètres d'entrée dans le modèle (paramètres au sol et NDVI) et l'intégration dans les S.I.G pour la généralisation.

#### **a) la prise en compte des paramètres collectés au sol.**

Les méthodologies de collecte des données au sol, de part la quantité de paramètres au sol collectés, sont contraignantes et fastidieuses (AGRHYMET, 1992). En faisant le point en 1992, le CRA a relevé les éléments suivants: la liste floristique, la densité des espèces, la mesure de la biomasse herbacée, inventaire de la strate ligneuse (densité, mortalité, etc.), et le recouvrement. En plus de ces aspects, la pluviométrie, le ruissellement, le type de sol, la topographie sont relevés. Au vu des résultats obtenus, il ressort que toutes ces variables citées ne sont pas introduites dans le modèle d'estimation. Leur prise en compte n'est réellement effectuée que dans des travaux de recherche. Les résultats de ces travaux indiquent selon les différents paramètres, les améliorations possibles qu'ils apportent dans la précision des résultats.

Sur la couverture végétale, l'étude menée au Niger en 1987 par Wagenaar et al. (1987) montre une grande variabilité entre les zones de couverture végétale différente. Sur leurs sites, dont une grande partie avait moins de 3% de couvert arboré, il était apparu que la présence d'arbres affectait la relation NDVI-Biomasse. L'introduction du taux de couverture ligneux comme covariable améliorait ainsi les relations obtenues car ce facteur expliquait à lui seul 53,8% de la variabilité observée entre une couverture de 3% et une de 10%. Dans le même ordre d'idée, les études menées sur les données du Gourma ont montré une amélioration de 13% de la part totale de la biomasse expliquée par le NDVI quand on introduit le facteur « taux de couverture ». Il faut bien distinguer la prise en compte du taux de couverture

herbacée ou arborée (en pour cent de la surface de sol) de celle de la biomasse des feuilles des arbres et des arbustes (en kg/ha).

Pour la biomasse aérienne, dans la plupart des pays, elle est prise en compte. L'amélioration qu'elle apporte est considérée comme pouvant justifier son introduction dans le modèle ( Diallo & al, 1991). Dans un autre sens, les études menées par Terjé (1993) sur le Gourma malien montrent sur certains sites, qu'une production de biomasse foliaire de ligneux très élevée n'est pas incompatible avec un modèle basé uniquement sur la biomasse herbacée.

Pour les sols, les interactions de la surface du sol avec les radiations électromagnétiques dépendent de plusieurs facteurs que sont l'humidité, la teneur en matière organique, la texture, la structure et la teneur en oxyde de fer (Terjé, 1993). Dans les travaux de collecte des données au sol, le facteur le plus couramment relevé est la texture. Malgré la normalisation du comportement des sols recherchée dans le calcul du NDVI, plusieurs travaux, notamment ceux menés par Hiernaux (1988), Hanan (1991) montrent des relations différentes entre sols sableux et argileux et proposent de définir séparément la relation entre indice de végétation et biomasse pour chaque type de sol en soustrayant la valeur de référence du substrat de l'indice. En effet, les sols argileux avec un indice élevé donnent des valeurs de NDVI intégré plus élevées que les sols avec un indice bas (rochers ou gravillons); A ce niveau, il faut signaler que d'autres auteurs proposent de réduire l'effet du sol sur l'indice par des méthodes de normalisation statistiques des valeurs NDVI (Djaby, 1996).

Au niveau de la composition végétale, la biomasse est aussi fonction du rapport graminées /dicotylédones comme le montre les travaux de Wagenaar et al. (1987) au Niger. Cette différence provient essentiellement de la structure du feuillage et du port des différentes espèces. Par ailleurs, Ibtissem (1995) montre que la prise en compte de la composition floristique améliore considérablement les coefficients de corrélation malgré les variations annuelles de biomasse végétale constatées.

D'autres paramètres non moins importants, mais souvent difficile à obtenir sont des facteurs qui influencent considérablement la valeur de la biomasse et par

conséquent la relation NDVI-Biomasse. Il s'agit de l'information sur les stades phénologiques et la litière.

## b) l'introduction du NDVI dans le modèle

Après l'obtention de la biomasse, les méthodes existantes pour mettre en relation les deux éléments sont nombreuses. Parmi celles ci, on peut distinguer comme suit:

- la corrélation simple entre NDVI Maximal saisonnier et Biomasse en fin de saison des pluies (1)
- La corrélation simple entre NDVI moyen et Biomasse en fin de saison des pluies (2)
- La méthode de l'intégrale du NDVI avec la biomasse maximale (3)
- les relations multiples entre plusieurs facteurs et la biomasse.

### la méthode du NDVI maximal

La méthode (1) est la plus utilisée au Sahel et plus précisément au Tchad et au Burkina. A titre d'exemple, les équations du Burkina (Groten, 1991) et celui du Tchad (Secka et al, 1992) sont les suivantes :

- Burkina Faso:  $rdt = -757 + 11185.5 * NDVI; n = 33; r = 0.82, S.E = 386kg / ha$

- Tchad:  $Rdt = 0,00196NDVI - 0,08$

Les unités NDVI pour le Burkina Faso sont en NDVI réel et au Tchad, en compte numérique.

L'un des griefs rapportés à cette méthode lors de son utilisation au Sénégal par Tucker et al (1985) est que le maximum de NDVI ne prend pas en compte les pertes saisonnières de biomasse. En effet, pour ces pertes, le Houérou (1984) propose de faire la différence entre production réelle et production potentielle en tenant compte de l'impact de la pâture et les facteurs sols. En 1984, Hiernaux et Justice montrent, dans le Sahel Malien, la médiocrité des corrélations entre les

maxima saisonniers de l'indice NDVI et la Biomasse herbacée. Ils rapportent cependant une possibilité d'amélioration par la prise en compte des peuplements ligneux. D'autres voies d'amélioration ont été prospectées en particulier l'ajustement exponentiel qui s'est révélé meilleur que l'ajustement linéaire (Hiernaux et Justice, 1986). Cet ajustement selon Groten (1991) ne se justifie pas, car dans les valeurs de biomasse utilisées, des valeurs hors-limite n'avaient pas été supprimées. Par contre, eu égard à la puissance des ajustements linéaires, il n'est pas évident qu'un modèle non linéaire même en éliminant les valeurs extrêmes puisse devenir significatif par ajustement linéaire. Cet exemple se trouve bien illustré à travers les difficultés d'obtention de modèle linéaire quand pour un même pays, les sites dans les régions sahéliennes et soudaniennes sont combinées. Dans ce cas par exemple, les repousses en saison sèche ne sont généralement pas prises en compte. Ces repousses peuvent être celles de la fin de saison de pluie ou celles de la période sèche froide.

#### la méthode du NDVI moyen

L'utilisation de l'indice moyen, contrairement à l'indice maxima saisonnier est rare. Cependant si l'on s'en tient aux travaux menés par Secka (1992) au Tchad, cet indice serait supérieur à l'indice maximal. En effet, celui-ci rend compte de l'évolution de l'indice pendant la saison de croissance de la végétation et répond ainsi aux préoccupations de prise en compte de la durée de croissance et des pousses successives. Dans sa tentative de modélisation de la production fourragère au Burkina, Koudougou (1993) effectue une moyenne du NDVI sur la période de croissance et trouve des résultats similaires à d'autres travaux menés dans la même région.

En dépit des bons résultats obtenus par ces deux méthodes, des mesures précises au sol ont montré que la relation biomasse et indice de végétation change avec les divers stades phénologiques (Hiernaux, 1988). Dans les travaux menés au Niger, Wagenaar (1987) avait constaté que les pentes des droites de régression entre la biomasse et le NDVI diminuent à mesure que la saison de croissance progresse. En effet, dans les régions sahéliennes, le fait que l'indice de végétation atteint son maximum avant le maximum de biomasse ne permet pas de prendre en

compte une relation directe entre ces deux paramètres. De même, l'extrême variabilité de la biomasse dans le temps et dans l'espace ont conduit Hiernaux (1988) à rechercher une relation directe dans le temps entre l'intégrale de la courbe d'incrément du NDVI dans le temps et la biomasse.

### la méthode de l'intégrale du NDVI avec la Biomasse

Pour cette méthode, il faut distinguer l'intégration par rapport au temps et la composition.

Pour le suivi de la biomasse, Diouf (1995) effectue une intégration des images décennales sur l'ensemble de la période de croissance en appliquant l'équation suivante:

$$\left( \sum_{i=1}^l NDVI_i * \alpha_i \right) / P$$

ou NDVI est l'indice de végétation sur les MVC (maximum

value composite),  $\alpha$  est la période couverte par MVC, P est le nombre de jours de la période d'intégration.

Le NDVI annuel intégré s'obtient quant à lui par le NDVI moyen de 3x3 pixels sur une période d'un an (Justice et al , 1986). Cet indice sert surtout à la classification régionale de la végétation et permet de prendre en compte les aspects liés aux activités biotiques de la végétation, comme la durée de l'activité photosynthétique, le taux de matière verte et matière sénescence. La méthode utilisée est l'intégration de 12 valeurs mensuelles de NDVI. Cette période de temps varie suivant la période de composition. Cette technique permet de calculer en réalité la surface en dessous de la courbe de chaque période de temps. Elle donne par conséquent l'extension spatiale d'un profil donné. Hiernaux et Justice (1986) distinguent bien l'indice brut, l'indice composé et l'indice intégré dans leur étude comparative de différents types d'indice.

Les résultats obtenus sur les périodes de croissance réelle ou simulée d'intégration améliorent de manière sensible les relations Biomasse-NDVI que ceux utilisant une période d'intégration fixe. Cependant cela nécessite une bonne connaissance du début et de la fin de la saison de croissance. Les paramètres ont

longtemps été produits à partir des données pluviométriques et récemment à partir des données Météosat et des données NOAA-AVHRR (Moulin, 1995).

### les relations entre plusieurs facteurs et la biomasse

En plus de l'indice de végétation, les modèles existants font intervenir plusieurs paramètres en vue d'établir des régressions multiples. Parmi les facteurs pris en compte, on peut distinguer la composition floristique, la texture des sols, la distribution de la saison de croissance (Ibtissem, 1995).

Malgré les fortes corrélations observées dans ces modèles, et au vu des résultats obtenus par ailleurs, la question reste posée entre l'effort de collecte des données et la précision qu'elle apporte surtout à l'échelle régionale. De même, il apparaît une colinéarité entre les variables introduites dans ces modèles. Ceci milite en faveur de la restriction du nombre de variables en entrée après une analyse exploratoire de leur contribution comme facteur de modification de la biomasse totale. Le même auteur souligne qu'un tel modèle n'est utilisable que si on dispose de toutes les variables d'entrée et qu'au Sahel, rares sont les pays qui disposent de séries fiables sur ces paramètres.

Il convient aussi de distinguer les modèles de prévision basés sur les simulations de l'écosystème. Ces modèles se basent sur les mesures de la photosynthèse ou la simulation de phénomènes physiques réels entre le sol, les plantes et l'atmosphère. La plupart de ces modèles se sont révélés difficiles à mettre en oeuvre à cause du nombre de paramètres à introduire.

On assiste cependant à une amélioration de plus en plus significative des modèles par la prise en compte des données multispectrales issues des satellites (Mougin, 1994). Ces améliorations portent sur la prise en compte du bilan hydrique et des composants de la couverture herbacée dans des modèles qui tiennent compte des aspects physiques de la production et des caractéristiques physiologiques des plantes. Parmi ceux-ci, on peut citer le modèle STEP (Sahelian Transpiration Evaporation and Productivity model) qui permet de simuler de façon réaliste l'évolution saisonnière de la biomasse épigée (LO Seen, 1994) et les modèles

d'inversion qui sont des outils de calibration puissants des données satellitales. Des efforts sont faits aussi dans l'évaluation de la production nette à travers la prise en compte du rayonnement synthétiquement actif absorbée par la végétation et ont donné des résultats intéressants à l'échelle globale. Les nouvelles méthodes d'intégration de la haute et basse résolution semblent prometteuses pour le suivi de la végétation et l'évaluation de la biomasse (Fabio, 1998 ; Leprieur, 2000).

### **c) les produits issus des modèles.**

Les produits issus des différents modèles sont très souvent des cartes de biomasse à l'échelle nationale ou des cartes d'évolution du couvert herbacé. Elles résultent de l'utilisation de Systèmes d'Information géographique (SIG). Ces cartes sont destinées à l'alerte précoce nationale, aux décideurs et techniciens d'élevage. Ces cartes sont aussi des outils puissants de vulgarisation. Des tentatives d'amélioration des produits ont été effectuées pour dresser des cartes de capacité de charge. Malgré la justification de ces produits, plusieurs éléments limitent leur utilisation:

- La généralisation des résultats des sites situés dans la plupart des pays dans les régions pastorales au reste du pays. Ainsi, les erreurs commises dans ces zones sud sont très grandes et irréalistes.
- Les catégories de biomasse représentées sur les cartes ont des différences d'intervalle inférieures à la précision des équations. Sur cette question, les travaux de Wagenaar proposent des intervalles de classe supérieures à 400 kg MS/ha
- L'utilisation des produits s'avère difficile surtout à l'échelle à laquelle ils sont produits. En effet, les cartes au format A4 sont difficiles à exploiter au niveau local. De même, l'utilisation des formats numériques exige une bonne connaissance des outils SIG et l'existence d'une bonne base de donnée sur l'élevage.
- La fiabilité des produits, liée à l'utilisation de NDVI provenant des images GAC ou LAC. A ce propos, plusieurs remarques ont été faites sur la faiblesse de la résolution des GAC. Cependant, au vu des résultats obtenus au Burkina Faso (Groten, 1991), et du nombre de pixel nécessaire pour



corriger les distorsions géographiques (3x3 pixels), il ressort que le GAC peut bien être utilisé pour une évaluation globale de la biomasse. Cependant, l'introduction des facteurs sols et de bilan hydrique par l'approche de modélisation nécessite les images LAC pour obtenir des résultats précis.

#### **d) leçons pour la présente étude**

L'état de l'art dans l'évaluation de la production primaire au Sahel a montré que malgré les progrès réalisés dans le domaine de la calibration des données satellitaires avec les données de terrain, le problème de la réalisation de cette évaluation à grande échelle reste posé. Les aspects qui influencent cette extension sont liés aux méthodologie de collecte des données au sol, à la qualité des données de terrain et des données satellitaires et la fiabilité des méthodologies d'évaluation ou des modèles. Sur le plan méthodologique, plusieurs facteurs peuvent influencer la qualité de cette évaluation, en partant des méthodologies de collecte, aux paramètres d'input et aux hypothèses de travail sur le type calibration à faire. Parmi les facteurs, le facteur sol est considéré comme le plus important dans l'évaluation à cause de son influence sur l'indice de végétation. Sur le plan des produits, des efforts restent à faire afin de transformer ces produits en produits d'alerte et d'évaluation des productions agricoles. Des perspectives intéressantes s'offrent avec la modélisation de la production primaire et de la production nette par inversion et dans le couplage de la haute et basse résolution.

Dans le cadre de la présente étude basée sur les résultats d'un travail à l'échelle de terroirs, deux indices élaborés avec une méthode d'intégration réelle, dont l'un est censé réduire le facteur sol seront utilisés pour l'évaluation de la biomasse herbacée naturelle et cultivée. L'une des particularités de cette étude est l'utilisation de l'occupation des sols qui constitue une des grandes problématiques de l'application de la télédétection dans l'évaluation des productions agricoles au Sahel et l'échelle de travail.

## **5.2. Evaluation de la production herbacée dans le FAKARA**

### **a) méthodologie d'approche**

L'importance de l'évaluation de la production primaire dans les sites FAKARA découle des objectifs de l'étude de transfert de fertilité menée depuis six ans dans la région. Dans ce mécanisme, la production végétale joue un rôle de premier plan. Aussi, l'évaluation de la phytomasse est destinée à pourvoir le système naissant d'une clé de passage du niveau parcellaire à l'ensemble de la région. Le bilan de la masse végétale de la zone devrait permettre de disposer d'information suffisante sur la dynamique des ressources naturelles.

Sur la base des données au sol collectées et traitées par l'antenne de l'ILRI basée à Niamey, un essai de calibration est réalisé sur les images SPOT-VEGETATION, en l'occurrence des indices dérivés, NDVI et TSAVI. La calibration consiste à rechercher des relations entre les indices, la masse végétale sur pied des parcours, la masse totale des chaumes du mil et la masse totale en grains de mil. Un ou plusieurs modèles sont alors dégagés et une validation croisée est effectuée pour tester la consistance du modèle.

Deux critères essentiels sont pris en considération pour ce travail : Les unités géographiques comme unité spatiale d'étude à la lumière des résultats fournis par l'ILRI et la résolution pixellaire des images VEGETATION. Aussi, seules sont prises en compte les unités géographiques dont la superficie est supérieure ou égale au pixel des images utilisées. Le second élément est la prise en compte de la date de démarrage de la saison végétative dans le calcul des synthèses d'indices. Ce paramètre est généré à partir des données de variation temporelle du NDVI.

### **b) méthode de collecte des données**

Le travail de collecte des données et de traitement a été assuré par l'ILRI. Les données au sol proviennent de la base de données de l'ILRI sur les sites du FAKARA (annexe C). Dans cette région, l'ILRI travaille depuis 1994 et des mesures

de végétation y ont été réalisées. La méthodologie de collecte et de traitement des données est donnée dans Hiernaux (2000)

La méthode de relevé de l'ILRI est basée sur des mesures effectuées sur des transects choisis selon le type de sol et les caractéristiques de la végétation dans la zone d'étude. Les transects sont identifiés selon l'unité géographique. Trois types d'occupation de l'espace ont été considérés : les jachères, les champs et les zones non cultivées. Selon le type d'occupation de l'espace, le transect mesure 100 ou 200 m. Les relevés portent sur une soixantaine de transects dans toute la zone d'étude du Fakara, représentatifs de l'environnement du Fakara aussi bien pour les ligneux que les herbacées.

Pour les ligneux, les résultats de tous les sites, notamment la masse foliaire et la production de bois, sont estimés sur la base de relations allométriques entre la dimension de la couronne, la hauteur et le diamètre du tronc (Hiernaux, 2000)

Dans le cas des herbacées, les variables mesurées portent sur la masse sur pied avec une double évaluation (à vue d'œil et par mesure) et la composition spécifique.

La méthode statistique utilisée est une stratification multiple qui allie les différents niveaux (unités géographiques, occupation de l'espace). D'autres méthodes aléatoires sont utilisées pour les relevés sur les transects. De ces relevés, les données en sortie sont surtout à l'échelle de l'unité géographique.

Pour les herbacées sont fournies :

. la masse moyenne sur pied en kg de matière sèche à l'hectare pour les herbacées et les mauvaises herbes des champs.

. La masse totale de chaume, tige, gaine, feuille et grain pour les champs de mil.

Les autres données fournies pour cette étude notamment les bases de données, sont décrites en annexe D. Pour le présent travail, seule l'année 1998 a été utilisée. L'évaluation sera limitée à la partie herbacée dans cette étape du travail. Une

poursuite de ce travail est prévue et permettra d'embrasser toutes les productions végétales des sites du FAKARA.

### **c) problématique des données sol avec les données satellitales.**

A la lumière des données fournies par la méthode ci-dessus qui répond parfaitement aux objectifs définis pour les études de transfert de fertilité, il ressort que chaque paramètre ou variable est surtout en relation avec une unité d'occupation de sol dans une unité géographique. La représentativité statistique des données collectées sur un transect ne va pas non plus au delà de l'unité d'occupation.

En dépit des changements d'occupation de sol soulignés au chapitre 2.2, les statistiques de surface des unités géographiques à partir de la cartographie numérique montrent que la superficie moyenne est de  $0.72 \pm 0.03 \text{ km}^2$ , largement inférieure au pixel SPOT-VEGETATION. Par ailleurs, déjà dans le cadre du projet HAPEX, D'Herbes et al (1995) soulignaient, la difficulté de reconnaissance et d'utilisation des unités d'occupation du sol sur les images satellitales à haute résolution spectrale mais de faible résolution spatiale comme l'imagerie NOAA-AVHRR. Dans les études de calibration avec les données de basse résolution notamment celles ayant la même résolution, 3 à 9  $\text{km}^2$  sont considérés pour permettre la comparaison (Rasmussen, 1986). Cette dégradation de l'image ou de l'indice permet de réduire les erreurs éventuelles de géoréférentiation par une statistique qui intègre les pixels voisins comme la moyenne ou la médiane.

Aussi, l'utilisation de ces données dans la calibration de ce type d'imagerie nécessite une autre approche différente des approches classiques. Pour ce faire une forme d'agrégation des données est rendue nécessaire et porte sur les deux aspects, l'occupation et l'unité géographique. S'agissant de l'occupation des sols, l'absence de la cartographie numérique de l'occupation de sol sur une partie de la zone d'étude du FAKARA ne permet pas d'aborder le sujet complètement sous l'angle de ce facteur si important dans la dynamique de la végétation. Aussi, le présent travail se limite aux unités géographiques sur le plan spatial. Les unités d'occupation du sol

sont prises en compte uniquement en termes de classes d'occupation comme proposé dans les résultats fournis par l'ILRI.

Plusieurs hypothèses sont testées pour cette calibration, la condition essentielle étant de parvenir à des unités supérieures au km<sup>2</sup> et atteignant au plus 3 km<sup>2</sup> afin de réduire les erreurs de géoréférentiation.

Ceci peut se faire notamment par :

- l'attribution d'une classe dominante d'utilisation des sols à chaque unité géographique
- la pondération des valeurs de biomasse dans les unités géographiques selon le type d'occupation
- l'agrégation des unités géographiques pour l'obtention de zones dont la superficie est supérieure ou égale à 3 km<sup>2</sup>.

#### **d) préparation des données de production végétale pour la calibration**

Selon la méthode d'échantillonnage et les résultats des traitements par unité géographique, la calibration par les données satellitaires commande une résolution compatible avec la représentativité des sites ou des données au sol. Dans la situation actuelle, la représentativité des transects ayant servi à l'échantillonnage se situe seulement au niveau de l'occupation du sol et non de l'unité géographique. Malheureusement, l'absence des cartes d'occupation de sol pour l'année 1998 ne permet pas la mise en œuvre de cette hypothèse. Comme souligné dans les chapitres précédents, les résultats sur la biomasse végétale sont agrégés par unité géographique. Aussi, dans un premier temps, les exigences en matière de compatibilité d'échelle entre les images satellitaires et les données au sol, et l'idée de réduire d'éventuelles problèmes de géoréférentiation, conduisent à ne considérer que les unités géographiques ayant une superficie de plus du 1 km<sup>2</sup>.

Dans ce cas de figure, le problème de l'échantillonnage sur un ou plusieurs pixels se pose en termes de qualité de géoréférentiation. A ce niveau, deux mesures par GPS ont été réalisées dans la zone avant la collecte des données et au cours de

cette année afin de vérifier le positionnement de certains points remarquables comme les plateaux sur les images.

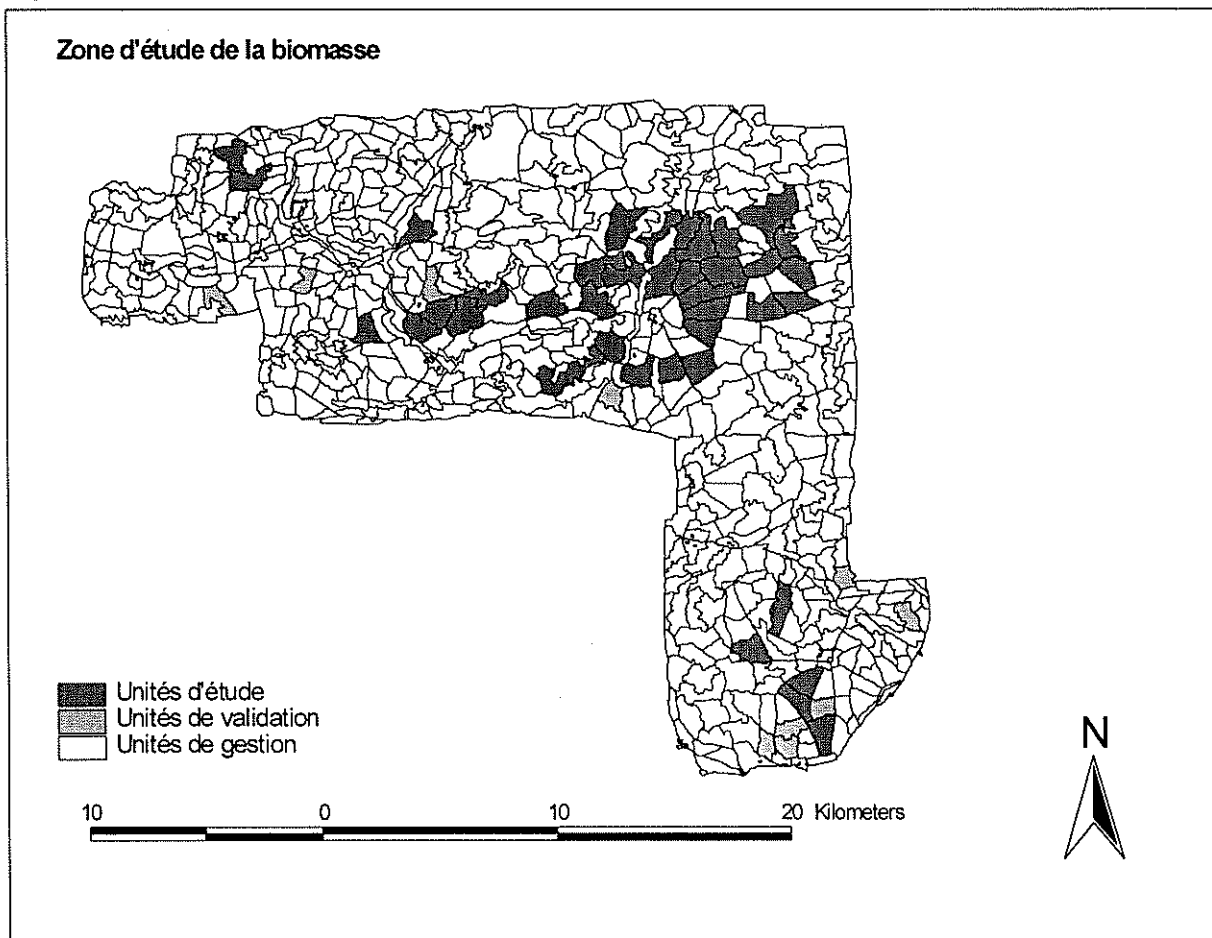
Les unités géographiques ont donc été choisies sur la base de leur superficie (supérieures ou égales à 1 km<sup>2</sup>). Sur cette base, 39 unités géographiques ont été sélectionnées et sont réparties sur l'ensemble de la zone d'étude de l'ILRI (cf. Carte 5.1). D'autres possibilités d'agrégation des données existent. Une moyenne pondérée de la valeur de différentes unités selon le type d'occupation permettra aussi d'avoir des unités plus grandes. Cette option doit cependant être vérifiée par cartographie afin de choisir des unités contiguës.

La réflexion a aussi porté sur la création d'unités selon des mailles (pixels) plus petites avec une résolution correspondant à la moyenne de la superficie des unités géographiques. Un rééchantillonnage (méthode de changement d'échelle) peut par la suite permettre la création d'espace dont la maille élémentaire correspond au pixel VEGETATION. Dans ce cas de figure, les moyennes pondérées des valeurs de biomasse peuvent convenir pour ces surfaces unitaires.

L'un des aspects les plus importants dans la calibration réside dans les caractéristiques de la végétation. Dans la zone d'étude, chaque type d'occupation de sol se caractérise par un ou plusieurs types de végétation. La variabilité à l'intérieur des unités d'occupation peut être spatiale ou temporelle. Cette variabilité est prise en compte dans le système d'échantillonnage pour les champs. Ceux-ci ont été stratifiés de bon champ à mauvais champ. L'importance de la masse végétale dépend des techniques de cultures, des facteurs externes (ravageurs, sauteriaux) mais aussi de la géomorphologie des sols.

Pour les jachères, l'étude de la zone indique qu'elles sont marquées sur le plan de la végétation ligneuse par une dominance de *Guiera senegalensis*.

Carte 5.1



L'importance de la végétation et la variabilité interannuelle de présence des espèces dans ce type d'occupation est fonction de l'âge. Pour les fourrés, présents surtout dans les brousses tigrées, Ambouta (1984) relève la variabilité au niveau des unités de végétation amenant à distinguer plusieurs types de brousses , diffuses, mouchetées, tigrées, etc.. Au vu de cette grande variabilité, et des superficies très petites liées aux différentes occupations de sol au Sahel, l'utilisation cohérente de l'imagerie satellitale de haute résolution spectrale et de faible résolution spatiale (1km) au niveau quantitatif doit être faite avec circonspection. Aussi, dans le présent travail, l'accent sera mis sur la première forme de différenciation du paysage par regroupement des unités selon l'importance des variables décrivant cette hétérogénéité.

Trois regroupements seront réalisés pour l'étude des relations NDVI-Biomasse

Les zones de jachères :

Ce sont les unités géographiques avec 70% ou plus occupés en jachère

Les zones de champs :

Ce sont les unités géographiques avec 70% ou plus occupés par des champs

Les zones mixtes :

Ce sont les zones où la superficie des champs et des jachères est inférieure à 70%.

#### **e) détermination de la date de démarrage pour la période d'intégration**

L'influence de la période de végétation, notamment le démarrage de la saison et sa durée sur la production de matière sèche a été soulignée dans le chapitre 5.1. Sur le Sahel, plusieurs travaux ont été conduits pour la détermination des différents paramètres de la saison agricole soit à partir des données de pluviosité journalière ou à partir des indices de végétation pour les besoins agrométéorologiques.

La détermination de cet indicateur dans la présente étude a été réalisée grâce au logiciel VAST . Ce logiciel a besoin de 4 paramètres d'entrée :

Le mois de démarrage du calcul du début de la saison (mois de mai : 5)

Le dernier mois de la série chronologique étudié (mois de septembre :9)

La valeur minimale d'indice pour avoir de la végétation (CN=50)

L'incrément nécessaire pour assister à une augmentation significative de l'indice de végétation (2 CN / décade pendant 3 décades)

Ainsi, à partir du mois considéré comme début de calcul, et en tenant compte de la valeur minimale d'indice à considérer et du point indiciaire, la zone sera considérée en croissance tant que le NDVI restera supérieur à ce seuil et avec comme limite le maximum saisonnier.

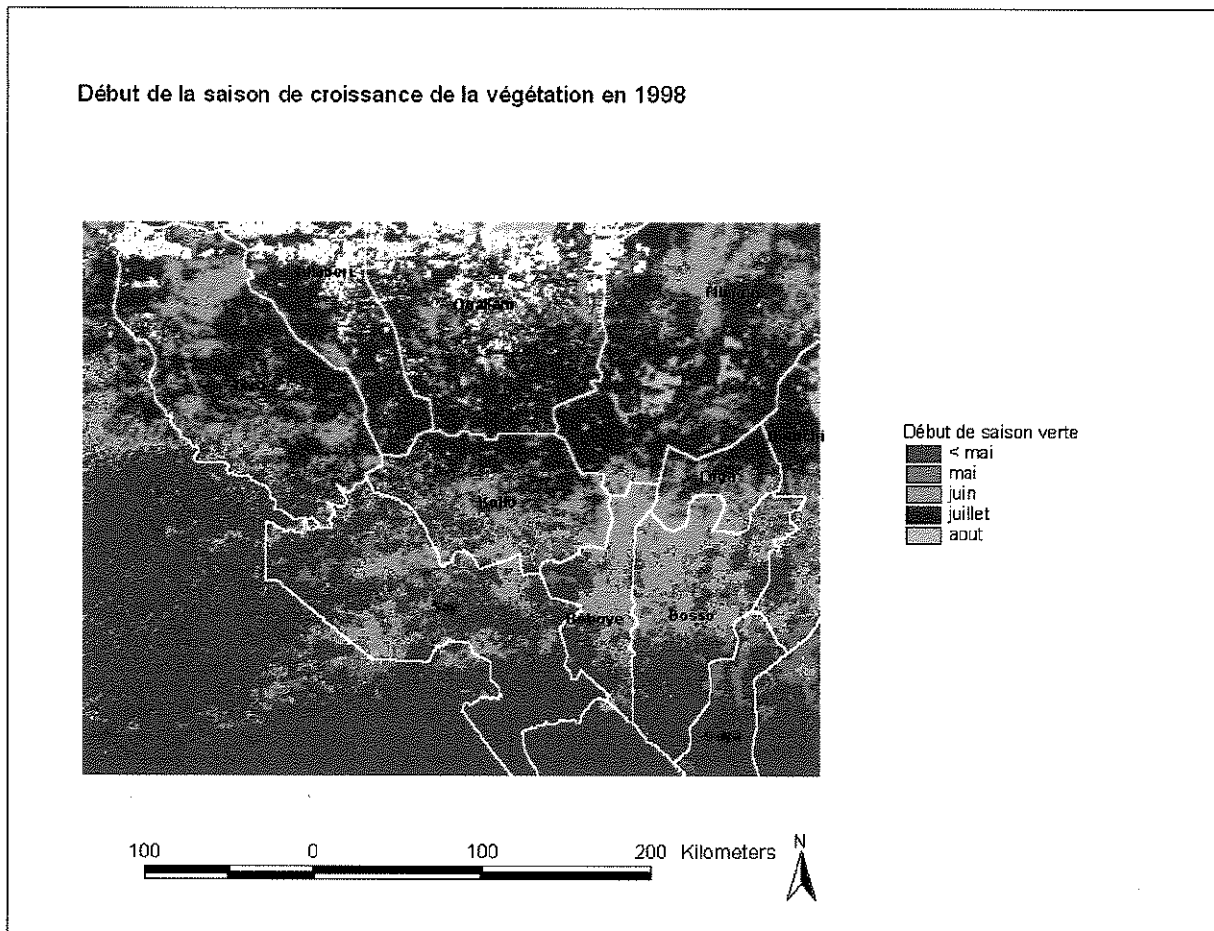


Sur la base d'un profil saisonnier de NDVI de la zone d'étude, les paramètres d'entrée avaient les valeurs suivantes: 5, 9, 50, 2. Après plusieurs tests de variation des données standards, ces différents paramètres proviennent des estimations faites sur la base des statistiques élémentaires du NDVI. Pour la fin de la saison, la période du maximum a été fixée. A ce niveau, il faut signaler qu'à partir de cette période située en septembre, il n'y a plus de croissance végétative.

Les résultats obtenus par cette méthode sont conformes à ceux fournis par la méthode Shivakumar (1993) sur la longueur de la saison agricole au Niger. Le début de la saison pour les différents sites se situent entre la troisième décennie de Juin et la 2<sup>ème</sup> décennie de juillet (cf. carte 5.2 ). Une étude à plus grande échelle utilisant les données NOAA-AVHRR du CRA de 1990 à nos jours permettra de combler plusieurs lacunes aujourd'hui existantes dans l'interpolation spatiale des paramètres de la saison agricole pluviale au Sahel.

Dans la pratique, l'intégration de l'indice de végétation se fait en prenant en compte réellement les jours de composition des images décennales. Le NDVI, de par la méthode qui est utilisée pour son élaboration, ne prend pas en compte toutes les images journalières à cause des perturbations atmosphériques. Cette donnée n'est pas fournie avec les images SPOT-VEGETATION en notre possession. Le nombre de jours total de la décennie sera alors considérée comme coefficient de pondération pour toutes les images décennales dans l'intégration. L'intégrale correspond dans ce cas de figure à la moyenne du NDVI d'un point de vue relatif si celle ci est calculée sur la période de croissance. Pour le TSAVI, les mêmes périodes seront utilisées compte tenu qu'il est aussi sensible à l'activité chlorophyllienne.

## Carte 5.2



### f) évaluation de la biomasse herbacée

L'analyse bivariée de corrélation a été utilisée. Cette analyse permet d'apprécier la relation entre 2 variables à l'aide de plusieurs coefficients. Le coefficient de corrélation de Pearson a été utilisé comme mesure de la relation linéaire en considérant comme variable dépendante la biomasse des unités géographiques et variable indépendante les différents agrégats des indices (intégrale, maximum ). La valeur du coefficient varie entre  $-1$  et  $1$ . Le seuil de probabilité choisi pour le risque de première espèce est de 5% et le signe du coefficient indique la direction de la relation et sa valeur absolue indique la force de la relation.

## La calibration du NDVI

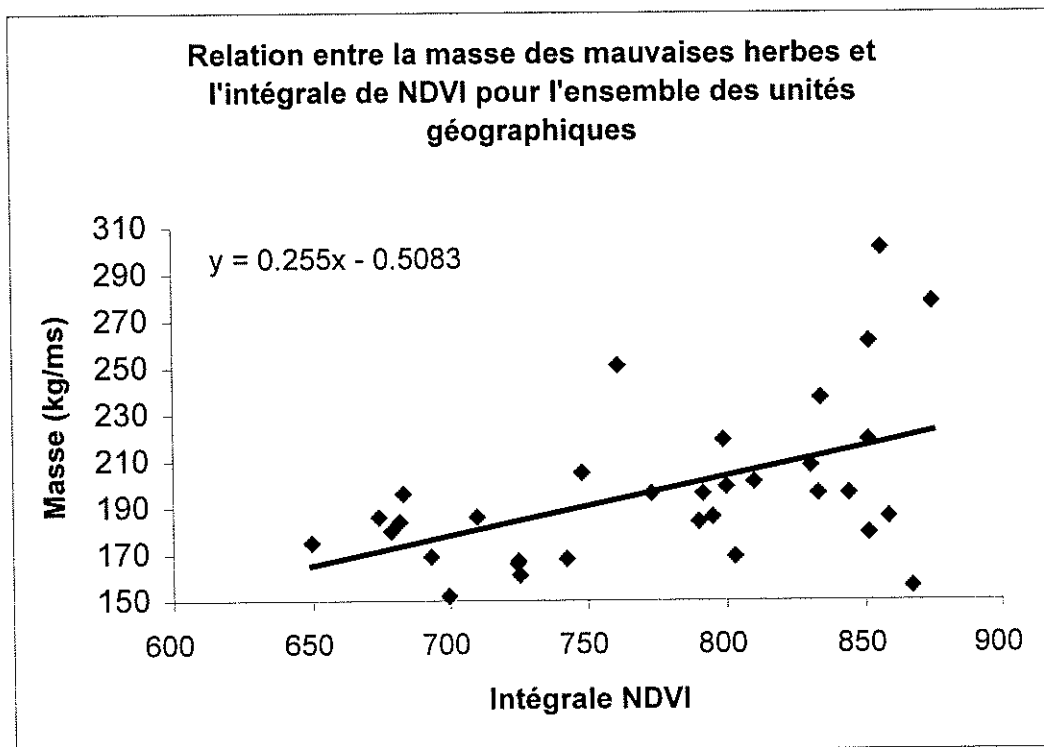
### ***l'analyse globale de tous les sites***

En intégrant toutes les unités géographiques et les types d'occupations dans le modèle, on obtient les résultats suivants :

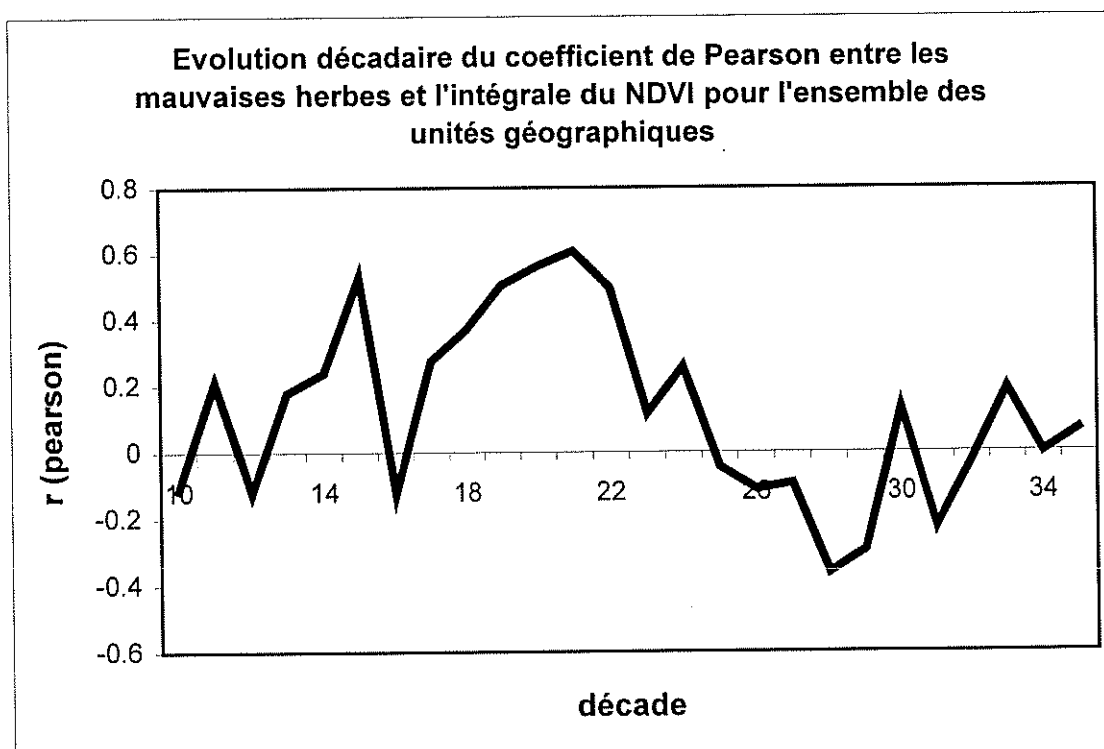
- La masse moyenne pondérée sur pied des parcours n'est corrélée à aucune autre variable
- La masse des mauvaises herbes est la variable qui présente le plus de corrélation. Sur l'ensemble des unités géographiques, cette corrélation apparaît tout d'abord en début de saison à la troisième décade de mai. Les 2 décades suivantes, aucune corrélation n'apparaît. Au cours de la période de croissance, de juillet à août, on observe des corrélations significatives. ( $r$  varie entre 0.40 et 0.61 avec des niveaux de signification de 1 pour mille). Une autre corrélation apparaît au mois d'octobre à la première décade (cf. graphiques 5.1 et 5.2) ;
- La masse en grains et le chaume de mil

Pour le mil, les différents paramètres collectés sont corrélés entre eux (cf. graphique 5.1.). Les tests ont porté sur deux variables qui sont la masse de grains et le total des chaumes. Sur le plan de l'évolution saisonnière du coefficient de Pearson, les corrélations significatives s'observent surtout dans les 2 dernières décades d'août, la première décade de septembre et à partir de la 3<sup>ème</sup> décade d'octobre jusqu'en fin Novembre ( $r$  varie entre 0.3 et 0.5). Ces périodes correspondent bien à la phase de maturation et de récolte du mil. Des corrélations à signe négatif et significatives existent avec la première décade d'avril jusqu'à la 2<sup>ème</sup> décade de juin. Au niveau des synthèses NDVI, la moyenne ou l'intégrale sont corrélées significativement avec ces deux paramètres. (tableau 5.1 )

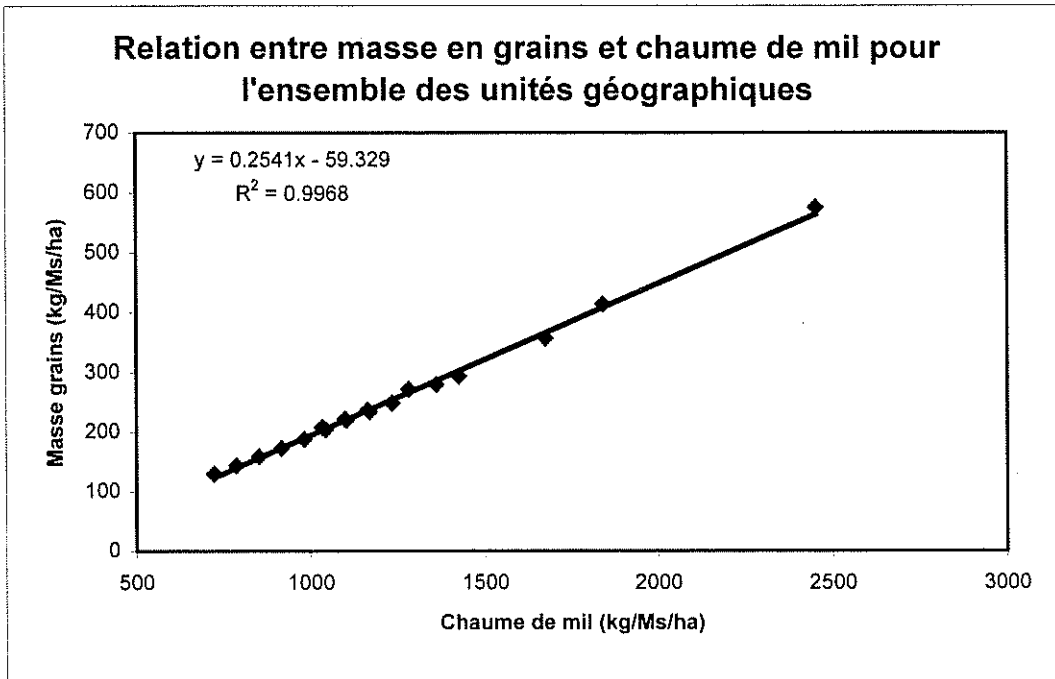
**Graphique 5.1**



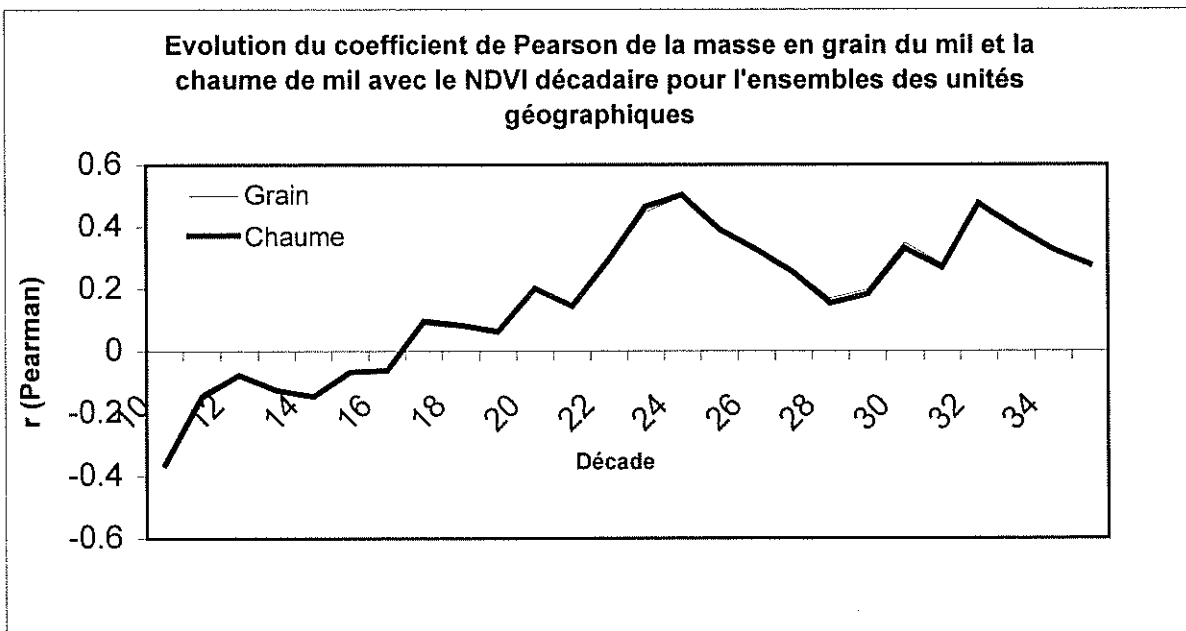
**Graphique 5.2**



**Graphique 5.3**



**Graphique 5.4**



**Tableau 5.1**

Variables : MILGRY : Masse en grains ; MILTOY : Chaume de mil ; EVBHY : Masse des jachères ; VI\_MAX : NDVI Maxima ; VI\_MOY : NDVI moyen ; VI\_SUM : Intégrale du NDVI

**orrélations entre les différentes masses végétales et les synthèses de NDVI dans les sites du FAKARA en 1998**

		MILGRY	MILTOY	EVBHY	EVBMY	VI_MAX	VI_MOY	VI_SUM
Coefficient de Person	MILGRY	1.000	.998**	.101	-.276	.171	.423*	.364*
	MILTOY	.998**	1.000	.101	-.267	.156	.426*	.376*
	EVBHY	.101	.101	1.000	.100	-.059	.024	.144
	EVBMY	-.276	-.267	.100	1.000	-.284	.074	.499**
	VI_MAX	.171	.156	-.059	-.284	1.000	.640**	-.053
	VI_MOY	.423*	.426*	.024	.074	.640**	1.000	.565**
	VI_SUM	.364*	.376*	.144	.499**	-.053	.565**	1.000
Probabilité (2-tailed)	MILGRY	.	.000	.583	.120	.341	.014	.037
	MILTOY	.000	.	.581	.133	.385	.013	.031
	EVBHY	.583	.581	.	.587	.747	.896	.431
	EVBMY	.120	.133	.587	.	.110	.683	.003
	VI_MAX	.341	.385	.747	.110	.	.000	.769
	VI_MOY	.014	.013	.896	.683	.000	.	.001
	VI_SUM	.037	.031	.431	.003	.769	.001	.
Nombre des unités géograp.	MILGRY	33	33	32	33	33	33	33
	MILTOY	33	33	32	33	33	33	33
	EVBHY	32	32	32	32	32	32	32
	EVBMY	33	33	32	33	33	33	33
	VI_MAX	33	33	32	33	33	33	33
	VI_MOY	33	33	32	33	33	33	33
	VI_SUM	33	33	32	33	33	33	33

\*\* : Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* : Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

### ***l'analyse par type d'occupation de sols***

- les Champs

Les corrélations obtenues avec les unités géographiques de ce type sont très élevées avec la moyenne de NDVI (0.90) et le maximum de NDVI (0.73) et sont significatives. Pour les deux variables de masse des champs. il faut noter que l'intégrale du NDVI n'est pas corrélée avec les différentes masses. En revanche, le maximum est corrélé avec ces paramètres (cf. tableau 5.2)

Les résultats obtenus avec les indices décadaires sont aussi significatifs .

(r compris entre 0.7 et 0.9) seulement à partir de la troisième décade d'août jusqu'en fin novembre.

- les jachères

Dans les jachères, les corrélations trouvées ne sont pas significatives entre la masse sur pied des parcours et le NDVI. De même, aucune corrélation significative n'a été obtenue avec les indices décadaires. (cf. tableau 5.3)

Tableau 5.2 et Tableau 5.3

**Corrélations entre les différentes masses végétales et les synthèses de NDVI dans les sites du FAKARA en 1998 pour les unités géographique à dominance champs**

		MILGRY	MILTOY	EVBYM	VI_MAX	VI_MOY	VI_SUM
Coefficient de Pearson	MILGRY	1.000	.999**	-.547	.737*	.901**	.272
	MILTOY	.999**	1.000	-.563	.737*	.905**	.253
	EVBYM	-.547	-.563	1.000	-.714*	-.513	.455
	VI_MAX	.737*	.737*	-.714*	1.000	.848**	-.146
	VI_MOY	.901**	.905**	-.513	.848**	1.000	.171
	VI_SUM	.272	.253	.455	-.146	.171	1.000
Probabilité (2-tailed)	MILGRY	.	.000	.160	.037	.002	.515
	MILTOY	.000	.	.146	.037	.002	.545
	EVBYM	.160	.146	.	.047	.193	.257
	VI_MAX	.037	.037	.047	.	.008	.730
	VI_MOY	.002	.002	.193	.008	.	.685
	VI_SUM	.515	.545	.257	.730	.685	.
Nombre d'unités géog.	MILGRY	8	8	8	8	8	8
	MILTOY	8	8	8	8	8	8
	EVBYM	8	8	8	8	8	8
	VI_MAX	8	8	8	8	8	8
	VI_MOY	8	8	8	8	8	8
	VI_SUM	8	8	8	8	8	8

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**Corrélations entre les différentes masses végétales et les synthèses de NDVI dans les sites du FAKARA en 1998 pour les unités géographiques à dominance jachères**

		VI_MAX	VI_MOY	VI_SUM	EVBHY
Coefficient de Pearson	VI_MAX	1.000	.672*	.390	.360
	VI_MOY	.672*	1.000	.732*	.271
	VI_SUM	.390	.732*	1.000	.129
	EVBHY	.360	.271	.129	1.000
Probabilité (2-tailed)	VI_MAX	.	.048	.299	.341
	VI_MOY	.048	.	.025	.481
	VI_SUM	.299	.025	.	.741
	EVBHY	.341	.481	.741	.
nombre d'unités géog.	VI_MAX	9	9	9	9
	VI_MOY	9	9	9	9
	VI_SUM	9	9	9	9
	EVBHY	9	9	9	9

\*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

- les zones mixtes (cf. Tableau 5.4)

Sur les 16 zones considérées comme zone mixtes, 9 zones comportent 60% de champs et 40 % jachères et 3 zones , 40% champs et 60% de jachères. Une zone présente 50% de jachères, 50% de champs, 2 zones sont à dominance sol nu et une zone avec les quatres types d'occupation à raison de 20% de sols nus, friches, jachères et 40% de champs. Dans ces zones, aucune corrélation significative n'existe entre les paramètres de biomasse et ceux du NDVI.

### ***Discussion sur les résultats du NDVI***

Les relations NDVI, et Biomasse montrent une liaison plus forte pour les occupations de sol homogènes que pour un espace plus hétérogène.

L'espace champêtre présente en effet des caractéristiques plus homogènes que les parcours. Dans les champs, les deux types de strates sont aussi mises en évidence : celle des cultures et celle des mauvaises herbes qui permettent d'augmenter le taux de couverture végétale. Dans ce type d'occupation des sols, seuls les ligneux les plus utiles sont conservés. Selon les études menées par Breman (1991), le taux de recouvrement des champs par les espèces ligneuses varie de 0 à 15 % dans la région sahélienne . Il est admis que la moyenne est d'environ 5 %. Une telle couverture n'influence pas les indices.



**Tableau 5.4**

**orrélations entre les différentes masses végétales et les synthèses de NDVI dans les sites du FAKARA en 1998 dans les zones mixtes**

		VI_MAX	VI_MOY	VI_SUM	EVBY	MILGRY	MILTOY	EVBY
Coefficient de pearson	VI_MAX	1.000	.717**	.284	-.121	.059	.039	-.191
	VI_MOY	.717**	1.000	.773**	-.104	.197	.199	.045
	VI_SUM	.284	.773**	1.000	-.070	.445	.464	.204
	EVBY	-.121	-.104	-.070	1.000	-.302	-.289	.223
	MILGRY	.059	.197	.445	-.302	1.000	.998**	-.262
	MILTOY	.039	.199	.464	-.289	.998**	1.000	-.245
	EVBY	-.191	.045	.204	.223	-.262	-.245	1.000
Probabilité (2-tailed)	VI_MAX	.	.002	.286	.656	.827	.887	.478
	VI_MOY	.002	.	.000	.703	.464	.461	.868
	VI_SUM	.286	.000	.	.798	.084	.070	.449
	EVBY	.656	.703	.798	.	.255	.277	.406
	MILGRY	.827	.464	.084	.255	.	.000	.326
	MILTOY	.887	.461	.070	.277	.000	.	.361
	EVBY	.478	.868	.449	.406	.326	.361	.
Nombre d'unités géog.	VI_MAX	16	16	16	16	16	16	16
	VI_MOY	16	16	16	16	16	16	16
	VI_SUM	16	16	16	16	16	16	16
	EVBY	16	16	16	16	16	16	16
	MILGRY	16	16	16	16	16	16	16
	MILTOY	16	16	16	16	16	16	16
	EVBY	16	16	16	16	16	16	16

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Les relations non significatives dans les jachères sont certainement liées à la présence de végétation ligneuse mais aussi à la diversité d'âge des jachères. Malgré la présence abondante de *Guiera senegalensis*, l'importance de son couvert varie selon l'âge des jachères.

Le comportement des mauvaises herbes au cours de la saison correspond à leur cycle et aux pratiques culturales. En effet, il est ici possible de lier les pratiques culturales de la zone à l'évolution du coefficient de Pearson. La masse végétale des mauvaises herbes est significativement corrélée avec le NDVI toute la saison. Aussi, l'indice de végétation mesuré sur les champs est une combinaison des deux masses végétales. A ce stade, une étude de la composition ou de l'importance des mauvaises herbes sur les rendements des cultures peut être intéressante.

Dans les zones mixtes, aucune relation n'est apparue avec le NDVI. A l'image des jachères, le problème de la sensibilité du NDVI aux couverts mixtes est posé. La réponse pourrait venir des nouvelles méthodes de déconvolution linéaire.

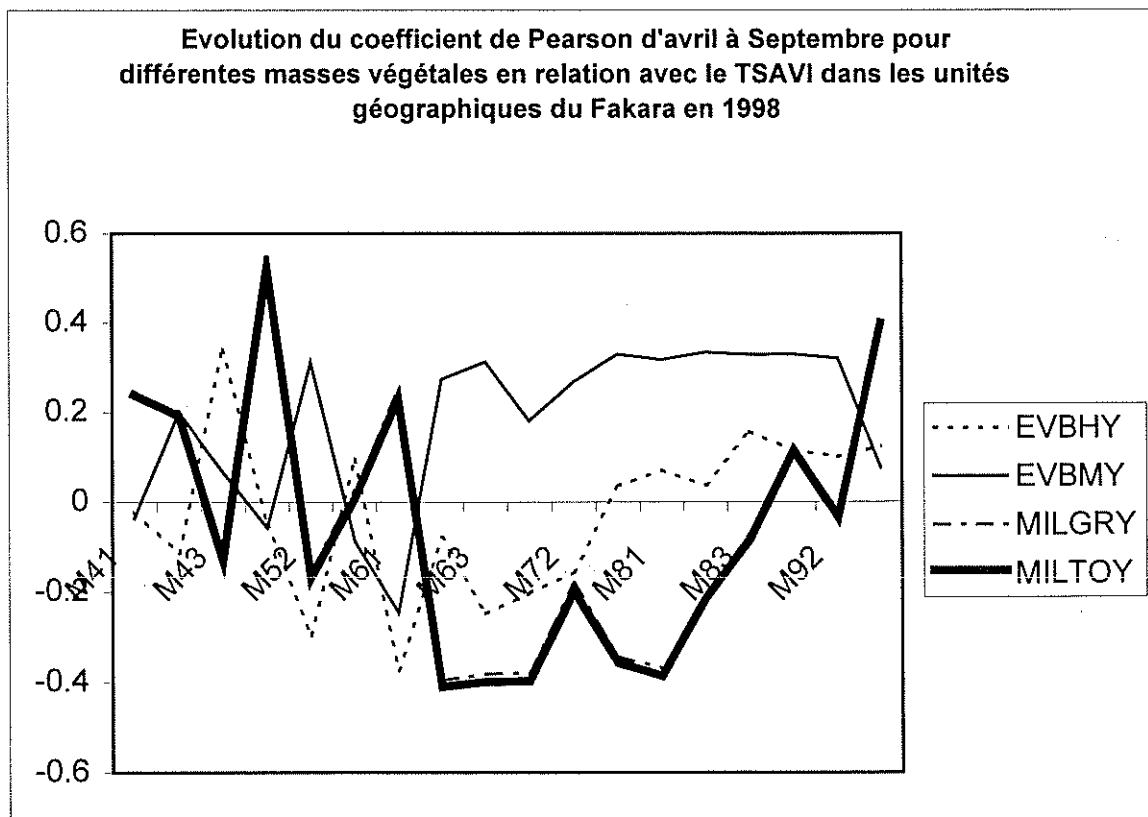
### La calibration du TSAVI

#### ***l'analyse globale de tous les sites***

La mise en relation des données de l'ensemble des unités géographiques de l'échantillon donne seulement des corrélations significatives avec les mauvaises herbes ( $r=0,41$ ). (cf. tableau 5.5) pour le TSAVI intégré sur la saison de croissance.

Des relations significatives avec le TSAVI sont trouvées pour la biomasse des parcours et le mil en grain ( $r$  varie entre 0.4 et 0.5) en début de saison et plus précisément au mois de mai. Le sens de cette relation change en milieu de saison mais elle reste toujours significative (graphique 5.5)

**Graphique 5.5**



**Tableau 5.5**

Corrélations entre les différentes masses végétales et les synthèses de TSAVI dans les sites du FAKARA en 1998 pour l'ensemble des unités géographiques

		EVBY	EVBYM	MILGRY	MILTOY	TSAVIMX	TSAVIMY	TSAVISUM
Coefficient de Pearson	EVBY	1.000	-.154	.167	.171	.165	.063	.031
	EVBYM	-.154	1.000	-.282	-.275	.242	.253	.414*
	MILGRY	.167	-.282	1.000	.998**	.266	-.168	-.160
	MILTOY	.171	-.275	.998**	1.000	.260	-.186	-.173
	TSAVIMX	.165	.242	.266	.260	1.000	.582**	.631*
	TSAVIMY	.063	.253	-.168	-.186	.582**	1.000	.930*
	TSAVISUM	.031	.414*	-.160	-.173	.631**	.930**	1.000
Probabilité (2-tailed)	EVBY	.	.401	.361	.349	.368	.730	.868
	EVBYM	.401	.	.118	.127	.182	.162	.018
	MILGRY	.361	.118	.	.000	.142	.357	.382
	MILTOY	.349	.127	.000	.	.151	.307	.344
	TSAVIMX	.368	.182	.142	.151	.	.000	.000
	TSAVIMY	.730	.162	.357	.307	.000	.	.000
	TSAVISUM	.868	.018	.382	.344	.000	.000	.
Nombre d'unités géog.	EVBY	32	32	32	32	32	32	32
	EVBYM	32	32	32	32	32	32	32
	MILGRY	32	32	32	32	32	32	32
	MILTOY	32	32	32	32	32	32	32
	TSAVIMX	32	32	32	32	32	32	32
	TSAVIMY	32	32	32	32	32	32	32
	TSAVISUM	32	32	32	32	32	32	32

\*. Correlation is significant at the 0.05 level ).

\*\*. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

TSAVIMY : TSAVI moyen, TSAVIMX : TSAVI maxima ; TSAVISUM : Intégrale du TSAVI

### *l'analyse par type d'occupation de sol*

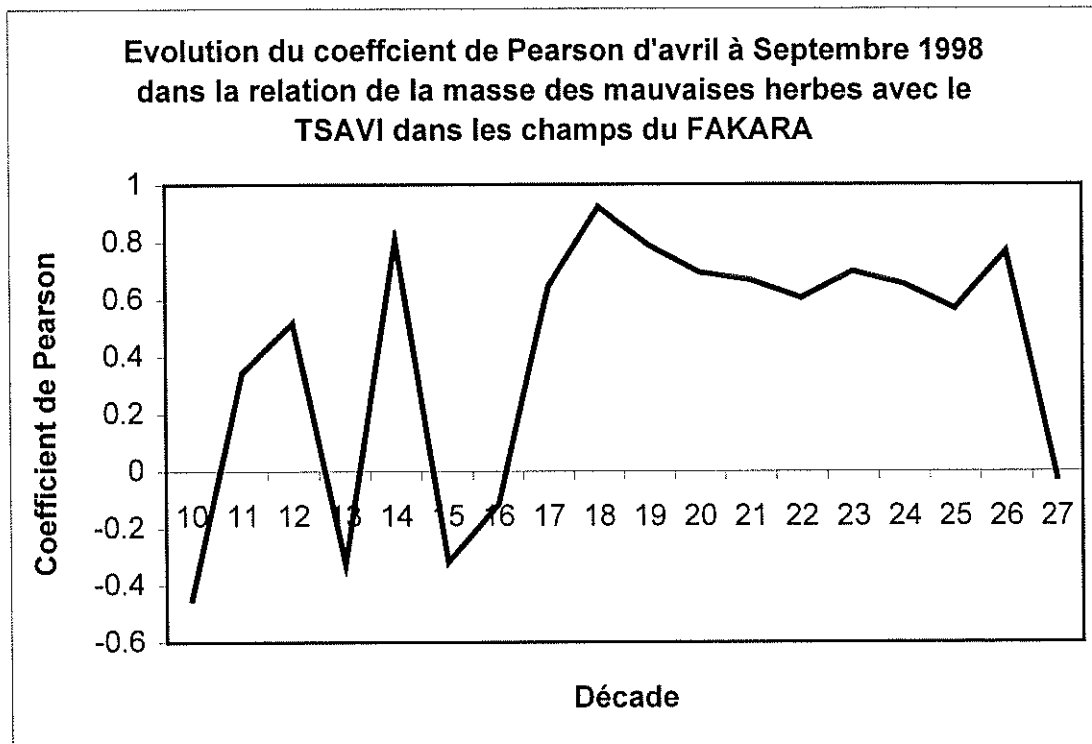
- les champs

Les corrélations significatives apparaissent surtout avec les mauvaises herbes ( $r=0.720$ ,  $r=0.772$ ) pour le TSAVI moyen et le TSAVI intégré (cf. tableau 5.6) Elles sont également significative en analyse saisonnière.

Les indices saisonniers de TSAVI sont en relation avec la masse des mauvaises herbes . Cette relation reste significative surtout en saison hivernale avec

des valeurs atteignant 0.90. Au cours de la saison pluvieuse, la relation se maintient surtout entre la 3<sup>ème</sup> décade de juin et de juillet (cf graphique 5.6)

**Graphique 5.6**



- les jachères

Aucune relation significative n'apparaît avec les masses de biomasse des jachères tant pour les synthèses d'indice que pour les indices saisonniers.

- les zones mixtes

Dans les zones mixtes, aucune corrélation n'est apparue entre les masses végétales et les variables synthétiques du TSAVI.

L'évolution décadaire montre une relation entre la biomasse sur pied des parcours en début de saison ( $r=0.685$ ) et une corrélation significative avec la masse en grains (avec un  $r$  maximum de 0.724) en mai, juillet et août. (cf graphique 5.7)

**Tableau 5.6**

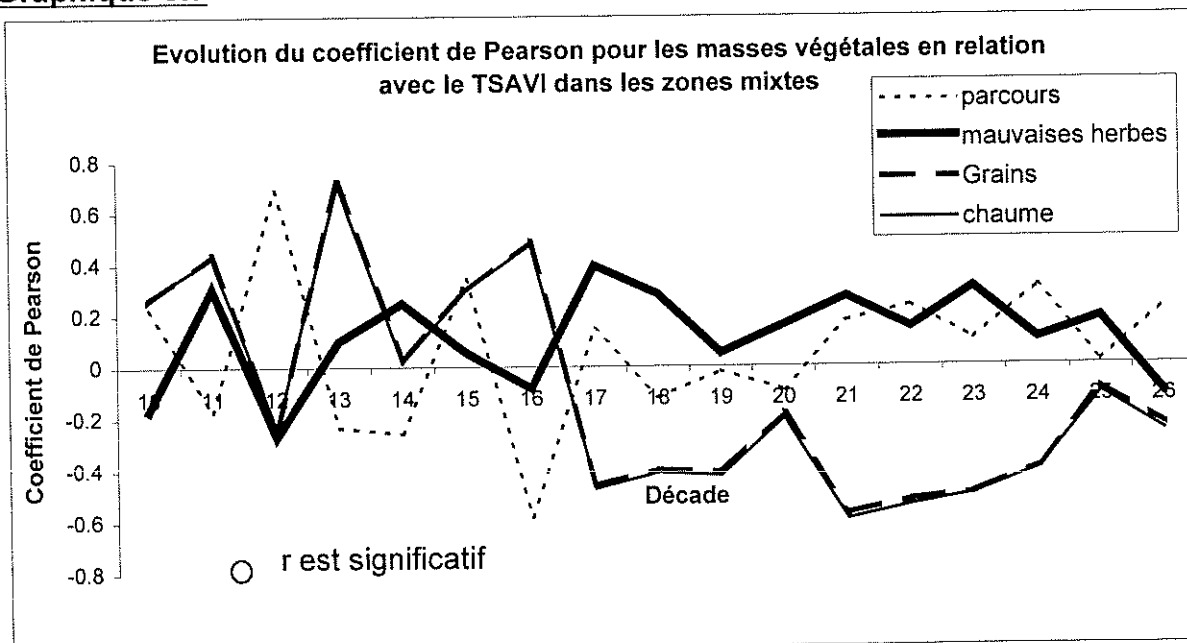
**Correlations entre les différentes masses végétales et les synthèses de TSAVI dans les sites du FAKARA en 1998 pour les unités géographiques à dominance champ**

		EVBMV	MILGRY	MILTOY	TSAVIMX	TSAVIMY	TSAVISUM
Coefficient de Pearson	EVBMV	1.000	-.546	-.562	.498	.720*	.772*
	MILGRY	-.546	1.000	.999**	.313	-.097	-.186
	MILTOY	-.562	.999**	1.000	.285	-.119	-.205
	TSAVIMX	.498	.313	.285	1.000	.793*	.773*
	TSAVIMY	.720*	-.097	-.119	.793*	1.000	.984**
	TSAVISUM	.772*	-.186	-.205	.773*	.984**	1.000
Probabilité (2-tailed)	EVBMV	.	.128	.116	.173	.029	.015
	MILGRY	.128	.	.000	.412	.805	.632
	MILTOY	.116	.000	.	.457	.761	.597
	TSAVIMX	.173	.412	.457	.	.011	.015
	TSAVIMY	.029	.805	.761	.011	.	.000
	TSAVISUM	.015	.632	.597	.015	.000	.
Nombre d'unité géog.	EVBMV	9	9	9	9	9	9
	MILGRY	9	9	9	9	9	9
	MILTOY	9	9	9	9	9	9
	TSAVIMX	9	9	9	9	9	9
	TSAVIMY	9	9	9	9	9	9
	TSAVISUM	9	9	9	9	9	9

\*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

\*\*. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

**Graphique 5.7**



## ***discussion sur les résultats du TSAVI***

Comme le NDVI, le TSAVI est lié à la masse de mauvaises herbes aussi bien quand toutes les unités sont confondues que dans les champs. Il permet de mettre en évidence des liaisons avec la biomasse des parcours et le mil en grain au cours de la saison.

Dans un espace homogène, le TSAVI donne l'impression de mettre en évidence l'élément le plus important. Il apparaît moins intéressant de ce point de vue que le NDVI surtout au niveau des champs. Les coefficients de corrélation apparaissent moins élevés.

Si le TSAVI est conseillé dans le suivi des zones à végétation clairsemée, il apparaît cependant que les relations linéaires avec les masses végétales ne sont pas très bonnes aussi bien dans les zones végétalisées homogènes qu'hétérogènes. D'ailleurs la plupart des études utilisent surtout le TSAVI non pour l'estimation des rendements mais pour le couvert végétal. Ceci ne devrait pas poser de problèmes au vu des corrélations existantes entre NDVI et TSAVI. Une estimation du couvert devra permettre une meilleure utilisation du TSAVI. Par ailleurs, des essais de prise en compte du TSAVI comme covariable représentant le facteur importance du couvert devrait améliorer certaines relations trouvées avec le NDVI.

### la validation croisée

Pour la validation croisée, il existe plusieurs variantes qui permettent d'estimer l'erreur de généralisation d'un algorithme d'apprentissage pour un certain ensemble de données. La méthode utilisée s'appelle le train/test. Dans cette méthode, une certaine fraction des données est utilisée pour entraîner et le reste pour tester. C'est la méthode la plus simple et la plus rapide, cependant elle ne fonctionne pas si on a peu de données.

Dans l'étude menée, les meilleures corrélations ont été surtout trouvées sur des zones homogènes, avec des échantillons ne dépassant pas 10 unités

géographiques. Le partitionnement de ces échantillons pour une validation croisée peut poser de sérieux problèmes quand au respect des conditions de normalité requises pour ce type de test.

Pour cet exercice, le choix s'est porté sur l'échantillon des unités géographiques ayant une surface inférieure aux unités utilisées pour la modélisation. Cette approche introduit un biais qui peut augmenter l'erreur. Cependant au vu de l'erreur de positionnement de SPOT –VEGETATION de  $0.5 \text{ km}^2$  , les unités choisies rentrent dans l'intervalle de confiance.

Dans le cas précis, un échantillonnage aléatoire a été effectué sur les unités dont la superficie est comprise entre 0.7 et 0.9 Km<sup>2</sup>. L'idéal serait de prendre des unités ayant les mêmes superficies que celles utilisées dans le modèle. L'un des objectifs de notre travail étant de pouvoir extrapoler les résultats, des unités plus petites mais s'approchant de la superficie du pixel ont été choisies. Ces unités ont été sélectionnées à l'aide d'une interrogation par système d'information géographique de la base de données de la couche des unités géographiques du Fakara et sont au nombre de 114 unités.

Dans l'étude des corrélations entre les synthèses d'indice et la masse végétale, le modèle le plus performant sur le plan statistique est le modèle champ au départ du NDVI. Seules les unités respectant notre critère de champs ont été extraites (au nombre de 41 unités). A partir de la table extraite, un échantillonnage aléatoire permet d'extraire 25% des unités soit environ 10 unités. L'outil SAMPLE de SPSS a servi a cet échantillonnage.

La procédure de validation comporte un certain nombre d'étapes similaires à la construction du modèle :

- construction du modèle de régression sur la base des résultats de la corrélation
- évaluation de l'intervalle de confiance de la régression
- extraction des valeurs d'indice des sites

- calcul des indices moyennés et leur intégrale
- application du modèle à l'échantillon .

### **Construction du modèle**

Sur la base des tests significatifs de corrélation, un modèle champs est créé par la méthode de régression simple. Ce modèle est aussi testé d'une part par analyse de variance pour sa validité, d'autre part par le test t de student pour les paramètres du modèle. Ce dernier test permet de calculer l'intervalle de confiance du modèle.

Le tableau 5.7 donne un aperçu des résultats du modèle champ. Celui ci est significatif avec une probabilité de 2 pour mille.

**Tableau 5.7**  
**Paramètres du modèle champ**

R carré	0.8
Constante	-2380.7
Pente moyenne	33.2
Erreur standard de la constante	516.6
Erreur standard de la pente	6.5
Valeur du t de student de test de la corrélation de la constante	-4.6
Valeur du t de student de test de la corrélation de la pente	5.1
Probabilité de signification du test t de la constante	0.004
Probabilité de signification du test t de la pente	0.002
Valeur de Fisher du test de la regression	25.9
Probabilité du test de la regression	0.002

- équation du modèle

Pour les deux termes du modèle linéaire, l'intervalle de confiance de la régression est calculé avec l'erreur standard des coefficients non standardisés. L'équation du modèle est  $y=33.2x-2380.7$  .(y en kg/MS/ha et x en CN)



- extraction des sites tests

La phase d'extraction des sites exige leur repérage au niveau spatial afin d'obtenir les valeurs du NDVI. Ce repérage nécessite la construction d'une nouvelle couche d'information ne contenant que les sites tests (cf. Carte 5.1). Cette couche permet par la suite d'extraire les paramètres concernant la période d'intégration des indices pour le calcul des valeurs de  $x$  dans le modèle champ.

L'extraction des valeurs d'indice des unités géographiques test s'effectue par rastérisation de la couche des sites tests et sa superposition aux différentes couches relatives à la date de démarrage calculée au chapitre 5.2.5 et aux couches décennales de NDVI.

- calcul des indices moyens et application du modèle

La validation du modèle a été effectuée sur 25% des sites représentant le critère d'occupation de sol considéré comme champs. Ce taux est significatif sur le plan statistique au vu des erreurs standards obtenus pour les masses végétales. Cependant, dans l'application proprement dite, les valeurs indiciaires de 3 unités n'ont pas pu être extraites soit pour des raisons de proximité ou des raisons liées à la forme des unités par rapport aux pixel.

Les résultats de l'application du modèle comparés aux valeurs moyennes pondérées dont l'erreur standard est donnée dans les tables fournies par l'ILRI montrent que les valeurs obtenues sont comprises dans l'intervalle de confiance. Toutefois il ne faut pas perdre de vue que des écarts considérables sont obtenus dans le site TK52 et TG5 (cf. tableau 5.8).

**Tableau 5.8. Résultats du Cross validation**

Unités géographiques	TK52	TZ6	D6	NM7	TG5	BL3	TG3
décade integration	19	19	17	17	17	17	17
Ndvi_moyen (Compte numérique)	88	79	83	77	77	79	79
Masse grain réel (kg/ha)	249	144	576	159	654	249	298
Erreur Standard (kg/ha)	81	51	196	55	221	81	99
masse estimée en grain (kg/ha)	534	219	343	175	151	214	229
Intervalle de conf. à 95% (kg/ha)	159	100	384	108	433	159	194

### Conclusion partielle

Dans ce chapitre, les indices calculés à partir des canaux du visible et du proche infra rouge de SPOT Végétation, le NDVI et le TSAVI ont été mis en relation avec des données collectées au sol dans l'ouest du Niger sur une zone couvrant 100 km x 100 km.

Différentes synthèses des indices comme le maxima saisonnier, la somme saisonnière (voir la moyenne) ont été calculés en tenant compte de la période réelle de croissance de la végétation sur base du NDVI au niveau pixellaire.

Des corrélations ont été établies entre ces synthèses d'indices, les indices décadaires avec des masses pondérées de végétation sur des unités territoriales comprenant des champs, des jachères et des sols nus ayant des dimensions comprises entre 1 km<sup>2</sup> et 5 km<sup>2</sup>.

Les résultats indiquent que les relations sont plus fortes dans des zones homogènes tels que les champs. Ils permettent aussi de mettre en évidence d'autres types de végétation tels que les mauvaises herbes des champs et leur comportement saisonnier.

Des différences sont apparues entre le NDVI et le TSAVI au niveau des liaisons avec la masse de grains de mil. Le NDVI s'est montré plus performant pour l'estimation des rendements de mil que le TSAVI. En revanche, dans les zones de végétation complexe comme les jachères, le TSAVI se montre plus performant et donne une idée de la croissance de la végétation au cours de la saison.

L'application de la méthode train/test a permis de valider le modèle champ. Cette technique permet effectivement de voir que les champs classés comme moyens dans le système de stratification de l'ILRI donnent de bons résultats avec la méthode de calibration linéaire. Les valeurs trouvées par les résultats des modèles restent dans l'intervalle de confiance des valeurs obtenues au sol.

Les mauvaises relations obtenues proviennent de deux éléments essentiels :

- La limite liée à la taille des unités géographiques qui dépasse rarement 4 pixels SPOT-VEGETATION dans notre échantillon.
- La méthodologie de collecte et d'élaboration des masses végétales sur les sites du FAKARA n'est pas à priori destinée à la calibration d'indice provenant de la basse résolution
- L'occupation des sols est très fluctuante sur les unités : la productivité des champs dépend du type de sol et des pratiques culturales. La productivité des jachères dépend de l'âge de la jachère et de la pression pastorale. Les masses végétales des brousses tigrées dépendent de la même pression pastorale.

Aussi, ces facteurs dont certains ont été évalués quantitativement dans la méthodologie utilisée par l'ILRI peuvent améliorer les résultats d'une calibration mais rendrait encore davantage, l'utilisation de la basse résolution quasi-impossible pour une évaluation de la phytomasse herbacée en zone agropastorale.

## CONCLUSION

La présente étude porte sur l'utilisation de la télédétection basse résolution pour le suivi des parcours du bétail en zone agropastorale sahélienne au Niger. Elle a eu comme premier objectif de mieux cerner l'impact d'un indice de végétation, le TSAVI, sur les zones à couvert végétal faible en comparaison avec le NDVI. Le deuxième objectif porte sur l'amélioration de la qualité de l'évaluation de la phytomasse des parcours du bétail par une bonne connaissance de l'occupation des sols. Pour mener à bien cette étude, une réflexion a porté d'une part sur la place de l'élevage dans la sécurité alimentaire des sahéliens, et d'autre part sur l'amélioration de l'information nécessaire pour son suivi. Cette démarche permet de bien situer le contexte dans lequel cette nouvelle technologie qu'est la télédétection est utilisée dans les pays du Sahel.

Plusieurs recherches ont porté sur l'évaluation par la télédétection, de la production et la qualité des parcours sahéliens. Mais, les systèmes d'alerte précoce chargés de produire des informations utiles en direction des décideurs, des techniciens et des utilisateurs primaires que sont les producteurs, utilisent peu ou pas du tout les produits issus de la télédétection. Cet état de fait provient des problèmes d'accessibilité à l'information, sa pertinence, mais aussi l'échelle à laquelle l'information est fournie. L'étude montre que les structures s'occupant de l'élevage doivent s'orienter vers une production d'informations fiables sur ces parcours à l'échelle locale, nationale et régionale afin de disposer des éléments pertinents à même de compléter les informations satellitaires.

Pour atteindre les objectifs sus-cités, les images issues du satellite européen SPOT-VEGETATION ont été utilisées. Pour le premier objectif, la présente étude a abouti à des résultats aussi bien sur les méthodes de calcul de cet indice que des tests qui ont été effectués. Au cours de l'élaboration de l'indice, le calcul des paramètres de la ligne des sols qui sont des inputs pour le TSAVI a été effectué sur l'ensemble du Niger au mois d'avril 1998 et sur une zone invariante du Niger. Les résultats obtenus sont identiques et s'accordent avec des études menées dans les mêmes zones avec des radiomètres au sol. L'équation retenue est  $Y=14.23+1.07x$

avec  $x$  représentant la réflectance dans le canal rouge et  $y$  la réflectance dans le proche infra-rouge.

La sensibilité des deux indices a été testée dans un espace orthonormé à deux dimensions formé par le canal rouge et l'indice de végétation NDVI ou TSAVI. Les résultats confirment à cette échelle de travail que le TSAVI est moins influencé par les sols. Cependant le problème de la linéarité de la ligne des sols reste posé car des variations importantes de certains types de sols persistent.

Au niveau des tests, l'évolution saisonnière des deux indices par l'étude des profils décadaires montre qu'ils permettent tous de déceler l'activité photosynthétique et ont le même comportement au cours de la saison de croissance. De légères différences apparaissent en début de saison où TSAVI se montre plus performant pour discriminer des zones de végétation précoce.

L'utilisation des indices de végétation dans la classification du territoire a été d'un grand apport pour améliorer les classifications agro-écologiques au Sahel. Ces classifications ont fourni des éléments importants sur l'occupation des sols. Au cours de ce travail, une classification simplifiée basée sur l'étude des profils saisonniers des canaux rouge et proche infra-rouge, et l'évolution des indices a montré la possibilité de discriminer différents types de sols dans la zone Ouest du Niger. L'analyse tendancielle des indices de végétation met en évidence les potentialités des sols. Celle des réflectances dans le canal rouge et proche infra rouge met plutôt en évidence l'occupation des sols. Une approche de classification automatique supervisée avec le classificateur de "distance minimum" montre que le TSAVI permet de mieux faire ressortir les types de sols que le NDVI. L'erreur d'omission du TSAVI est inférieure de 10% à celle du NDVI.

La seconde partie du travail a porté sur la calibration des indices TSAVI et NDVI de SPOT VEGETATION par des données de masse végétale herbacée (mil et herbes des parcours et des champs) issues d'une bonne connaissance de l'occupation des sols dans les sites du FAKARA. L'étude montre de manière globale qu'il n'existe pas de relation directe entre les indices de végétation et les masses végétales dans les situations d'occupation de sol morcelée comme c'est le cas en

zone agropastorale sahélienne à l'ouest du Niger . En revanche, cette relation s'améliore dans certaines situations d'occupation qui présentent une homogénéité d'au moins 70%, notamment les champs de mil. Les relations les plus intéressantes dans ce cas ont été trouvées avec les masses végétales des mauvaises herbes de ces champs. Ces relations sont persistantes tout le long de la saison avec ce type de couvert et mettent en évidence la bonne couverture végétale des mauvaises herbes dans les champs par rapport au mil dont le port est érectile. Aucune relation n'existe avec les masses végétales herbacées des jachères.

Cette partie d'évaluation de la phytomasse herbacée en zone agropastorale dans les sites du FAKARA a porté uniquement sur les herbacées. Les limites de ce travail, en plus des problèmes liés à l'occupation des sols sont aussi fonction de la taille des unités géographiques et de la méthodologie de collecte et du traitement. Ces résultats peuvent s'améliorer par la prise en compte de tous les éléments distinctifs d'une occupation des sols tels que les pratiques pastorales, la qualité des sols, l'âge des jachères. Dans ce cas, l'échelle de calibration dépasse celle de la télédétection basse résolution.

Les perspectives sont à orienter alors vers la haute résolution, en l'occurrence l'imagerie LANDSAT 7 (cf. annexe D) qui sera bientôt disponible sur tout le Sahel au Centre Régional Agrhymet. La résolution au sol de ce senseur dans les bandes du visible et du proche infra-rouge est de 30 m. Une bande panchromatique de 15 m de résolution est aussi disponible. Les résolution des ces images les rend intéressantes dans les études d'occupation et d'utilisation des terres et des sols en zone agropastorale sahélienne. Elles peuvent alors être couplées aux images SPOT-VEGETATION pour le suivi de la saison de croissance végétale. De même, l'extrapolation des méthodes d'évaluation de la phytomasse des parcours du bétail ou des rendements agricoles pourra être évaluée avec ce type de senseur.

En terme opérationnel, cette étude montre aussi que le Centre Agrhymet devra se concentrer sur le suivi qualitatif de la saison de croissance avec le NDVI couplé à un indice de végétation comme le TSAVI. Cette approche donnera une meilleure qualité dans le suivi des zones végétalisées en zone sahélienne. La comparaison du NDVI de NOAA-AVHRR produit au Centre Régional Agrhymet avec le NDVI de SPOT-

VEGETATION montre aussi que l'utilisation des images de ce dernier senseur, SPOT VEGETATION, apporte des améliorations dans les zones moins végétalisées du Sahel. Les techniques et outils utilisés dans la détermination de la longueur de la saison végétative avec les indices de végétation sont à comparer avec les méthodes classiques qui utilisent les données de pluviosité décadaire issues des stations météorologiques. Si ces techniques s'avèrent performantes et fiables, elles permettront de pallier aux insuffisances de remontée des données du niveau national vers le niveau régional. Ceci devra permettre d'améliorer l'information au niveau du suivi des zones à risque de production agricole et pastorale au Sahel. La partie évaluation des productions végétales devra être poursuivie dans le cadre de développement méthodologique et de recherche dans un partenariat avec des structures ayant des compétences en matière de télédétection basse et haute résolution en zone sahélienne.

## BIBLIOGRAPHIE

AGRHYMET, 1991, Synthèse Régionale des situations agrométéorologiques , saison des pluies 1991 dans les pays du CILSS, Publication N°230

AGRHYMET, 1992, Les applications de la télédétection au suivi et à la gestion des ressources pastorales au Sahel. CIPEA, Agrhymet, Atelier du réseau sahélien de suivi pastoral, 2-6 Novembre 1992, Niamey.

AGRHYMET, 1993 - Actes de l'atelier «Estimation des pluies par satellite» Niamey, 02 - 04 décembre. 191pp.

AGRHYMET, 1996a, FLASH - Bulletin de suivi de la campagne agricole au Sahel. Spécial «Zones à risques». Méthodologie de suivi des zones à risque. Vol.2, n°0/96

AGRHYMET, 1996b, La définition du concept de "risque" dans le cas d'un système d'alerte précoce agrométéorologique (M. Garavini 1996, document de consultation)

AGRHYMET, 1998, Bulletin mensuel de suivi de la situation agro-hydro-météorologie dans les pays du Sahel, Aout 1998, Volume 8 : 5/98, Disponible sur l'internet : <http://www.agrhymet.ne>

AGRHYMET, 2000, Bulletin mensuel de suivi de la situation agro-hydro-météorologie dans les pays du Sahel, Publication N°M-04-00 ; Disponible sur l'internet : <http://www.agrhymet.ne>

AMBOUTA, J.,M., AMADOU I., SOULEY I., 1998, Gestion de la fertilité et évolution des sols de Gakudi (Maradi, Niger), Cahiers Agricultures, Volume 7, Numéro 5, pages 395-400, Septembre-Octobre 1998 ;disponible sur internet : <http://www.aupelf.fr//revues/agri/5.98/not3.htm#trf4>

AP3A, 2000, Système de gestion des base de données, OMM, CILSS, Coopération Italienne

BAD, 1998. Rapport sur le développement du capital humain, ISBN 0-19-829455-7 , 253 p.

BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F., 1995, A review of Vegetation indices. Remote Sensing Reviews, 1995, Vol 13, pp.95-120

BANNARI, A., HUETE, A. R., MORIN, D., & ZAGOLSKI, F., 1996, Effets de la couleur et la brillance du sol sur les indices de végétation. International Journal of Remote Sensing, 17(10), 1885-1906.; disponible sur l'internet: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/MODIS/ABSTRACTS/MST-A0289.html>>



BARET, F., GUYOT G., MAJOR, D.J., 1989, TSAVI: A Vegetation Index which minimizes Soil Brightness Effects on LAI and APAR Estimation, in Proceedings of the 12<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, IGARRS'90, Vancouver BC, Canada, 10-14 July, Vol. 3, pp. 1355-1358.

BARET, F., GUYOT, G., 1991, Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment, Remote Sensing of Environment, Vol. 35, pp. 161-173.

BARTHOLOME, E., 1988, Radiometric measurements and crop yield forecasting : some observations over millet and sorghum experimental plots in Mali. International Journal Of remote Sensing, Vol. 9, numéro 10,11, p.1539-1552.

BARTHOLOME, E., 1989, Contribution aux méthodes de suivi par télédétection satellitaire des rendements régionaux des cultures céréalières pluviales en Afrique soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat en Sciences : Université Catholique de Louvain, Louvain La Neuve, Belgique, Institut pour les applications de la télédétection (ISPRA).

BARTHOLOME, E., 1994, Télédétection et suivi des productions agricoles en Afrique de l'Ouest. Tiré de Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone, Presses Universitaires du Québec, 1994 ISBN 2-7605-0704-1

BARTHOLOME, E., 2000, Cours de télédétection à l'attention des étudiants en DES agrométéologie, FUL, année académique 1999-2000.

BEGUE, A., Qi, J., HEILMAN, .P, 1998, Applications of VEGETATION data to resources management in Arid and semi-arid rangelands , SPOT VEGETATION preparatory programme, preliminary report, PARIS, CNES; disponible sur l'internet ; Disponible sur Internet : <<http://sirius-i.cst.cnes.fr:8080/vgtprep/abstract/begue.html>>

BONN F., 1998, La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites, Cahiers de sécheresse, volume 9, Numéro 3, pages 185-192, Septembre 1998

BOUBE, G., 1980, Le Zarmatarey : contribution à l'histoire des populations d'entre Niger et Dallol Mawri. Etudes Nigérienne n° 45. Niamey, Niger Institut de recherches en Sciences Humaines.

BREMAN, H., DE N. RIDDER, 1991, Manuel sur les pâturages des pays sahéniens. ed. Karthala, Paris, CTA Wageningen. 481 pp.

BULDGEN, A., DIENG, A., 1997, Une ressource fourragère pour les régions tropicales : *Andropogon gayanus* var *bisquamulatus*, les presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique : 171 pp.

CANADIAN DAIRY NETWORK, 1998, Tendances génétiques de vaches ayant un indice en production et en conformation ; disponible sur internet : <http://www.cdn.ca>

CARRIERE, M., DEMBELE, O.M, 1995, Rapport de la mission d'évaluation de l'unité de suivi des ressources pastorales. Ministère Coopération -Paris, Min. Agriculture et Ressources Animales , Ouagadougou., Burkina Faso.

CLARK LABS, 1997, Manuel d'idrisi, version 2.0.

COMPERE, R., HELLEMANS, P., FISCHER M.,DE WINTER, J., 1994, Aménagement sylvo-pastoral des plateaux de la région de Niamey (Niger). 3.Plans d'aménagement des pâturages naturels et des forets Bull. Rech. Agron. Gembloux [1994] 29 (1) ISSN 0435-2033

CRIPPEN, R.E.,1990, Calculating the Vegetation Index Faster, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 34, pp. 71-73.

CROUAIL, J., 1992, Approvisionnement et relance des échanges communautaires en bétail et viande des pays membres de la CEBV. BDPA-SCETAGRI, Paris.

D'HERBES, J.M., DELABRE, E., LOIREAU, M., 1995, bases écologiques pour une spatialisation des données recueillies dans le cadre de l'expérience HAPEX-SAHEL, in Hydrologie et météorologie de méso-échelle dans HAPEX-SAHEL : dispositif de mesures au sol et premiers résultats, éditions ORSTOMS, eds : Thierry Lebel, 207 p.

DAGNELIE, P., 1974, Théorie et méthodes statistiques : applications agronomiques (vol 2, 2 éd.,) Les presses agronomiques de Gembloux.

DE ROUW A., 1997, Gestion de la fertilité des sols pour la culture de mil au Niger. In : Christian F. et Roger P.,(eds), Actes de l'atelier Jachère et maintien de la fertilité des sols, 2-4 octobre 1997, Bamako, Mali

DIALLO, O., DIOUF, A., HANAN, NDIAYE,A., PREVOST,Y., 1991, AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa. *Int. Journal rem. sen*, 12, (6), 1259-1279.

DIOUF, A.,BOCOUM, 1990, Calibrage des canaux 1 et 2 de NOAA-AVHRR pour une comparaison annuelle des données NDVI, 5<sup>th</sup> AVHRR data user's meeting, 35

DJABY, B., 1996a, Les élaborations sur les images GAC. Note technique, NT 09/AP3A/12/96,

DJABY, B., 1996b, Utilisation des images LAC sous IDA, Note technique, NT 16/AP3A/12/96.

DJABY, B., DE FILIPIS T., VIGNAROLI, P, KONE, B. , 1997, Méthodologie d'élaboration du front de végétation, Note Technique , 021/AP3A/97. disponible sur internet : <http://www.iata.fi.cnr.it>.

EBBE, S., 1998, De bonnes nouvelles d'Afrique : Fermiers, recherche agronomique et ventre plein, IFPRI, Washington DC.

EIDENSHINK, J. C., FAUNDEEN, J.L., 1992, 1-km AVHRR Global Land Dataset: first stages in implementation, U.S. Geological Survey contract 1434-92-C-40004.

FAO, 1989, Programme d'assistance pour la sécurité alimentaire: Méthodologie pour l'élaboration de programmes nationaux complets de sécurité alimentaire; FSAS 2ème consultation Ad Hoc Con 89/3

FAO, 1996, Déclaration de Rome sur la sécurité alimentaire mondiale et Plan d'action du Sommet mondial de l'alimentation, Sommet mondial de l'alimentation, 13-17 Novembre 1996

FAO, 1998a, Les bilans alimentaires : ce qu'ils sont et comment ils peuvent servir in séries de publications sur les bilans alimentaires

FAO, 1998b, Données de statistiques sur l'agriculture mondiale. Page Web; <http://apps.fao.org>

FAO, 1999, Données de statistiques sur l'agriculture mondiale. Page Web; <http://apps.fao.org>

FORTIER, J.J., DUPRAS, A., LACHAPELLE, B., 1991, La classification des pixels et l'estimation des proportions de chaque classe avec applications a la mesure de la surface des couverts forestiers, Télédétection et Gestion des Ressources, Vol. VII, Paul Gagnon (Éd.), ©1991, L'Association Québécoise de Télédétection.

GAVAUD M., BOULET R., 1964. Carte pédologique de reconnaissance de la République du Niger, Ed. ORSTOM ,

GEORGE H. ROSENFELD & KATHERINE FITZPATRICK-LINS, 1986: A Coefficient of Agreement as a Measure of Thematic Classification Accuracy. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 52,2: 223 – 227

GRIGUOLO S., 1994, "Pixel-by-pixel clustering for vegetation monitoring", paper presented at the International Conference on Early Warning and environmental Monitoring, Niamey, November- 1997

GROTEN, S.M.E., 1991, Biomass monitoring for rangeland management at national level in Burkina Faso. Presented at remote sensing Workshop STD3 programme EEC, Madrid.

HANAN N. P., PRINCE S.D., HIERNAUX P.H.Y, 1991, Spectral modelling of multicomponent landscapes in the sahel, 1991, International Journal of remote sensing, Vol 12, n°6, , 1243-1258

HAVARD M., LE THIEC G.,VALL, E., 1996, Les tendances majeures d'utilisation de la traction animale dans les pays francophones d'Afrique Sub Saharienne; 2ème Symposium de l'AAFRSRET, 21-23 août 1996, Ouagadougou, Burkina Faso.

HIERNAUX, P., 1983, Distribution des pluies et production herbacée au sahel:une méthode empirique pour caractériser la distribution des précipitations journalières et ses effets sur la production herbacée. premiers résultats acquis dans le sahel malien. Doc. Prog. N° AZ 98, CIPEA, Bamako.

HIERNAUX, P., JUSTICE, C.O., 1986, Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel Malien. International Journal of Remote Sensing, vol 7, N°11, 1515-1531.

HIERNAUX, P., 1988, Télédétection de l'évolution des ressources fourragères par satellite:Progrès dans l'étalonnage d'un indice radiométrique et premières applications au Gourma (Sahel Malien ). Bulletin du CIPEA 32, ,15-22.

HIERNAUX, P., 1997 Besoins d'information dans un système d'alerte précoce pastoral in Centre Régional Agrhymet, 1997. Actes du séminaire Expert consultation meeting sur l'alerte précoce agrométéorologique , Niamey, 28-30 avril 1997

HIERNAUX, P., GERARD, B., 1999, The influence of vegetation pattern on the productivity, diversity, and stability of vegetation : The case of ' brousse tigrée' in the Sahel ; Acta Oecologica 20 (3), 147-158.

HIERNAUX, P., 2000, The soils in villages lands in Western Niger, opportunities and constraints for rural development, Draft, ILRI, en cours de publication.

HOEPPFNER, M., LEBEL, T., MONTENY, B., 1992,. Experiment plan for Hapex-Sahel, Editions ORSTOM, Paris 1995, 177 p.

HOLBEN, B.N, FRASER, R. S., 1984, red and Near infrared response to off-nadir viewing. International Journal of Remote Sensing, N° 5:145-160.

HUETE, A. R., 1988, A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Remote Sensing of Environment, Vol. 25, pp. 295-309.

HUETE, A. R., 1989, Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra., ed. G.asrar , Theory and applications of optical remote sensing.,New York:John Willey & Sons.

HUETE, A. R., TUCKER C.J., 1991, Investigations of soils influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery. International Journal of Remote Sensing, Volume 12, numéro 6, p.1223-1242

IBTISSEM, T., 1995, Utilisation des systèmes d'information géographiques pour l'estimation de la production primaire herbacée sahélienne: application au Gourma malien. Th. Doct Géographie, Université Paris I, Sorbonne,

IEMVT, 1989, Elevage et potentialités pastorales sahéliennes - Synthèses Thématiques., CIRAD-IEMVT, CTA

JUSTICE, C.O., HIERNAUX, P.H.Y., 1986, Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA-AVHRR data. Int.J.of Rem.Sens, vol 7, N°11, 1475-1499.

KAUFMAN, Y.J., TANRE, D., HOLBEN, B. N., MARKHAM, B., GITELSON, A., 1992, Atmospheric Effects on the NDVI - Strategies for its Removal, International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1992, Houston, TX, May 26-29, Vol. 2, pp. 1238-1241.

KOUDOUGOU, Z., 1993, Development of GIS model of quantitative and qualitative aspects of rangelands biomass in the sahel of Burkina Faso, Msc Thesis, ITC, Enschede. The Netherlands.

LE HOUEROU, 1980, Les fourrages ligneux en Afrique, état actuel des connaissances , CIPEA, Addis Abeba, Ethiopia, 481 pages

LE HOUEROU, H.N., 1984, Rain use efficiency: a unifying concept in arid-land ecology. J.arid Enviro. 7:213-247

LEBEL T., AMANI, A., TAUPIN J.D., 1994, La pluie au Sahel : une variable rebelle à la régionalisation, Xè journées hydrologiques de l'ORSTOIM, 13-14-09-94, Montpellier : 353-372

LEEUWEN, W.J.D., HUETE, A.R., DUNCAN, J., FRANKLIN, J., 1993, Radiative transfer in shrub savanna sites in Niger: preliminary results from HAPEX-Sahel.3. Optical dynamics and vegetation index sensitivity to biomass and plant cover, Agricultural and forest meteorology Journal, 69, p 267-288

LEPRIEUR C., KERR H., MSTORECHIO, MEUNIER, J. C., 2000, Monitoring vegetation cover across semi-arid regions : comparison of remote observations from various scales, International Journal of Remote Sensing, Vol 21, n°2, , 281-300

LILLESAND, T.M., AND KIEFER, R.W., 1994, Remote Sensing and Image Interpretation, John Wiley and Sons, New York, NY, 750 pp.

LO SEEN, D., MOUGIN, E., RAMBAL, S., GASTON, A., HIERNAUX, P., 1995, A regional sahelian grassland model to be coupled with satellite multispectral data. II.

Toward the control of its simulations by remotely sensed indices. *Remote Sens. Environ.* 52: 194-206.

LOIREAU M., 1993, Dynamique d'un paysage sahélien au Niger. Bilan paysager entre la production primaire et l'utilisation des ressources par les groupes sociaux. Caractérisation de l'espace et des ressources à l'aide de la télédétection spatiale haute résolution. Mémoire de DEA « Espaces et Sociétés », univ. Paul Valéry, Dépt. De géographie humaine & ORSTOM, Niamey ; 123 p

LOIREAU, M., et D'HERBES J.M., 1994, Cartographie des unités d'occupation des terres du Super Site Central Est ( Banizoumbou) du programme Hapex-Sahel. Xè Journées hydrologiques de l'ORSTOM, 13-14-09-1994, Montpellier : 307-319.

MAJOR D.J. A, 1990, ratio vegetation index adjusted for soil brightness, *International Journal Of remote Sensing*, 1990, Vol 11, 5, 727-740

MASELLI, F., 1998, Multiclass Spectral Decomposition of remotely sensed scenes by selective pixel Unmixing, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 36, N°5, september 1998.

MAYAUX, P., GOND, V., BARTHOLOME, E., 2000 Application of SPOT 4-VEGETATION data for mapping the forest-cover of Madagascar , in *VEGETATION 2000 Lake Maggiore - Italy*, 3-6 April 2000

MCGUIRE, M.L., 1997, Status Report on Crop Use Intensity (CUI): Applications in the Fews Project, Fews Working Paper. Disponible sur internet: <http://www.fews.org/imagery/ag-cui.html>.

MCNAIM, H., PROTZ, R., 1993, Mapping Corn Residue Cover on Agricultural Fields in Oxford County, Ontario, Using Thematic Mapper. *Canadian Journal of Remote Sensing* 1993; 19: 152-9.

MICHEL, E., YADJI, G., 1998, Durabilité du système de production agricole nord-sahélien . Université de Niamey, Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich, 119 p

MOHAMED, M.A., FITZHUGH, 1995, an overview of demographic and environmental issues in sustainable agriculture in sub-saharan Africa. In : *Livestock an sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-saharian Africa*. Proceeding on the International symposium, Adis Abeba, Ethiopia, P3 – 20.

MOUGIN, E., LO SEEN, D., Rambal, S., Gaston, A., Hiernaux, P., 1995, A regional sahelian grassland model to be coupled with satellite multispectral data. I. Model description and validation. *Remote Sens. Environ.* 42: 217-238 Paris . Editions Economica, 251 p

PEKEL, J.F., 2000, Apport des données VEGETATION à l'élaboration d'une méthode automatique de cartographie de la végétation : application à une zone d'étude :le Burkina Faso, Mémoire d'ingénieur Agronome, Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Agronomiques.

PICKUP, G., CHEWINGS V.H, 1988, Estimation the distribution of grazing and patterns of cattle movement in a large arid zone paddock, , International Journal Of remote Sensing, 1988, Vol 9, 9, 1469-1490

PIRAUX, M., BULDGEN, A., STEYAERT, P., DIENG, A., 1997, Intensification of farming in the Sahelian-Sudanese region. 1. Crop management sequence in a risk context , Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, vol.1 n°3.

PNUD, 1995, Rapport mondial sur le développement humain. 1995, ISBN 2-7178-2864-8,

PRINCE, S.D., JUSTICE, C.O., LOS, S.O., 1990, Remote Sensing of the Sahelian Environment Current Status and Future Perspectives. Commission of the European Communities, Directorate General VIII and CTA Center for Agricultural and Rural Cooperation Technical Publications, Brussels. 128 p.

PRINCE, S.D., 1991, A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. International Journal of Remote Sensing, volume 12, p. 1313-1330.

PRINCE S.D., 1993, télédétection de l'environnement sahélien , Revue de l'état actuel et des projets futurs, CTA, CCE, DGVIII, ISPRA

PUREVDORJ, T.S.,TATEISHI R., ISHIYAMA T., HONDA Y., 1998, Relation between percent vegetation cover and vegetation indices, International Journal of remote sensing, Vol. 19, n°18, 3519-3535

QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A.R., KERR, Y.H., and SOROOSHIAN, S., 1994 . A modified soil adjusted vegetation index . Remote Sensing of Environment, 47, 1-25. Research Systems, 1999, ENVI on line Guide, Research Systems, Inc., Pearl East Circle, Boulder

RICHARDSON, A.J., WIEGAND, C.L., 1977, Distinguishing Vegetation from Soil Background Information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 43, No. 12, pp. 1541-1552.

SANDISON, D.S., 1999, using a four dimensionnal geographical information system to visualise the environmental impact of smol, thesis of Master of Science, Curtin University of Technology.

SECKA, Y., OUEDDO, D., 1992, Bilan de suivi du réseau d'observation des pâturages naturels au Tchad. (ROPANAT), Présenté à Atelier sur les Applications de la Teledetection. au suivi et a la gestion des ressources .pastorales. au Sahel., Niamey.

SEGHIERI J., GALLE, S., RAJOT, J.L., 1994, La brousse tigrée dans le sahel nigérien : étude de la co-fluctuation du stock hydrique et de la végétation annuelle., Xè journées hydrologiques de l'ORSTOM, 13-14-09-94, Montpellier : 509-541

SEGUIS, L., BOSCHER, C., ALBERGEL, J., 1994, Discrimination de différentes couvertures végétales par radiométrie de terrain en savane soudano-sahélienne, Xè journées hydrologiques de l'ORSTOIM, 13-14-09-94, Montpellier : 671-684,

SHIVAKUMAR, M.V.K., MAIDOUKIA A., STERN, R.D., 1993, Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : Le Niger. 2<sup>ème</sup> édition. ICRISAT / Direction de la Météorologie Nationale du Niger. Bulletin d'information n°5; 108 pp.

SIDIBE, S. , 1998. Aperçu Général sur l'élevage au Sahel, in Actes du séminaire sur les besoins d'information en élevage pour l'alerte précoce, Centre Régional Agrhytmet, Niamey, 14-18 Février 1998.

STANGEL, P.J., 1995, Nutrient cycling and its importance in sustaining crop-livestock systems in sub Sahara Africa : An overview. In Livestock an sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa. Proceeding on the International symposium, Addis Abeba, Ethiopia, P3 – 20.

STEFANO, R., BOTTAÏ, DJABY, B., VECCHIA, A., ET FABIO, M., 1997, Utilisation des images GAC NDVI pour la prévision des rendements agricoles au Sahel, ALTinforma, Revue Italienne de Télédétection, N°11, P. 27-32

TERJE, A. K., 1993, Influence des sols sur l'observation par satellite des pâturages sahéliens, une étude de cas:Le Gourma malien. Mali, Oslo, Norvège, 154 pp.

TERRIL, W.R., 1994, A FAQ on vegetation indices , THIS FAQ AVAILABLE VIA ANONYMOUS FTP AT: kepler.gps.caltech.edu - /pub/terrill/rsvefaq.txt

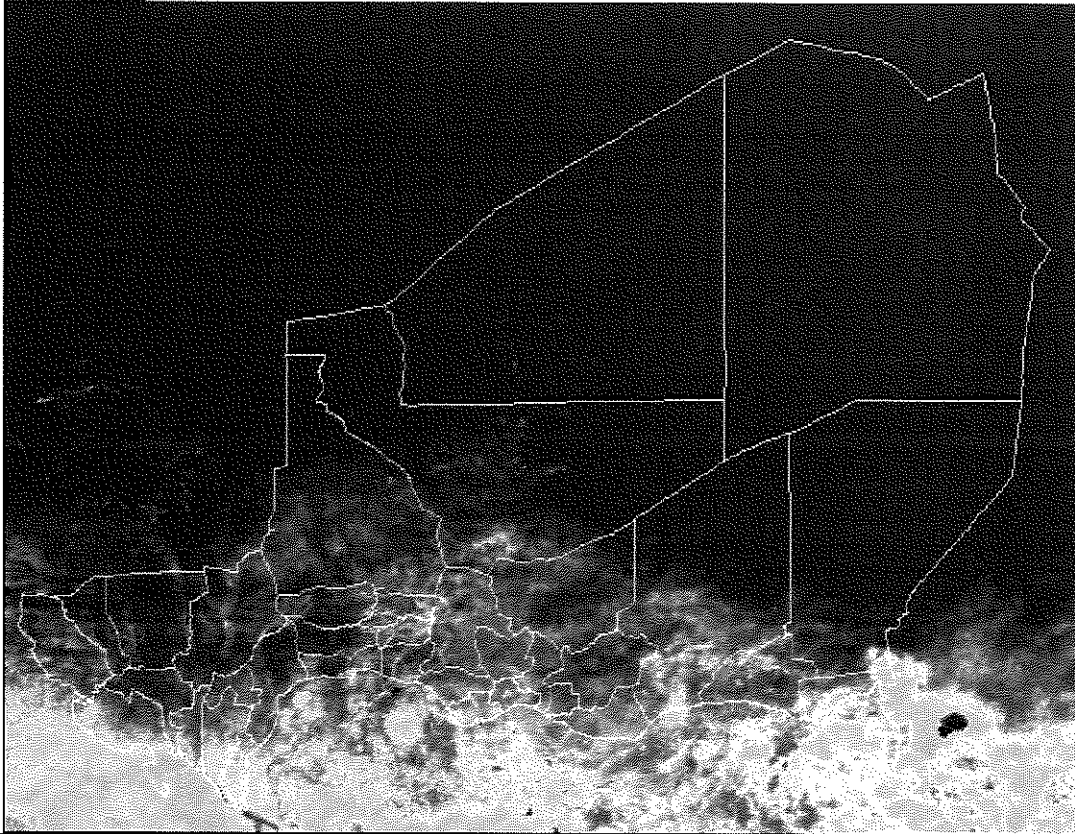
TYCHON, B., OZER, P., TOURE, S., 1999, Etude préalable des potentialités d'intégration des données du senseur VEGETATION dans les systèmes d'alerte précoce utiles en région sahélienne. , Rapport Final Contrat d'Etude n°T4/19/54, Fondation Universitaire Luxembourgeoise, ARLON, Belgique.

UNESCO, 1979, Ecosystèmes pâturés tropicaux, FAO, UNEP, Paris, 655 p  
VERHOEF W., 1984, Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling : the SAIL model. Remote Sensing of the Environment 16:125-141

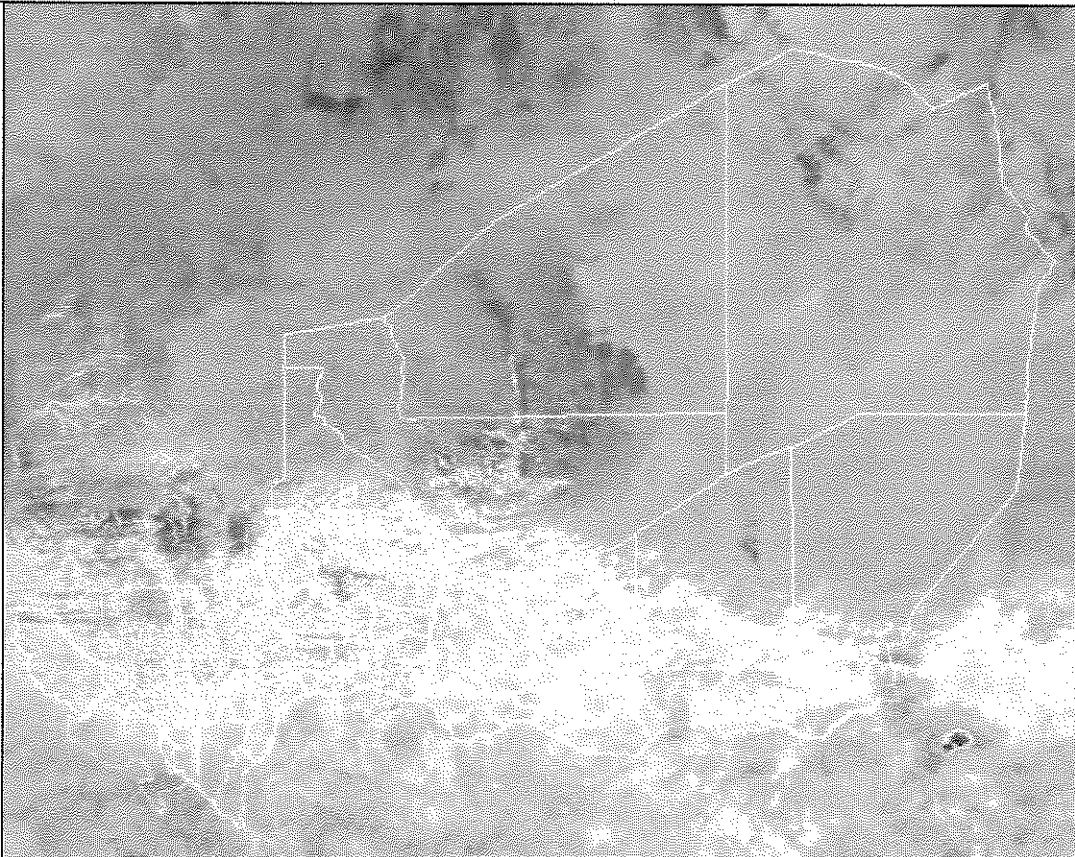
WAGENAAR, K.T., DE RIDDER, N., 1987, Estimation de la production et de la distribution de la biomasse dans la zone du projet PEI en 1985 d'après les valeurs NDVI obtenues par satellite. CIPEA, Addis Abeba, 45 pp.



**ANNEXE A : IMAGES NDVI et TSAVI<sup>1</sup> DE SPOT-VEGETATION**



**IMAGE NDVI (EN HAUT) ET TSAVI (EN BAS) DU MOIS D'AOUT 1998 – NIGER**



<sup>1</sup> La palette utilisée est d'IDRISI : IDRISI256 et les couleurs évoluent du vert foncé (255 en CN) au noir (0)

## ANNEXE B :TABLEAU D'ANALYSE DE VARIANCE

### COMPARAISON DU TSAVI MENSUEL DANS 23 VILLAGES DU FAKARA

Avril

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TSA	Between Groups	2.442E-03	22	1.110E-04	1.157	.330
	Within Groups	4.413E-03	46	9.592E-05		
	Total	6.854E-03	68			

Mai

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TSA	Between Groups	6.248E-03	22	2.840E-04	5.245	.000
	Within Groups	2.491E-03	46	5.415E-05		
	Total	8.739E-03	68			

Juin

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TSA	Between Groups	4.317E-03	22	1.962E-04	1.666	.072
	Within Groups	5.418E-03	46	1.178E-04		
	Total	9.735E-03	68			

Juillet

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TSA	Between Groups	5.375E-02	22	2.443E-03	3.339	.000
	Within Groups	3.365E-02	46	7.316E-04		
	Total	8.740E-02	68			

Aout

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TSA	Between Groups	8.584E-02	22	3.902E-03	2.465	.005
	Within Groups	7.280E-02	46	1.583E-03		
	Total	.159	68			

Septembre

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TSA	Between Groups	7.153E-02	22	3.251E-03	4.287	.000
	Within Groups	3.489E-02	46	7.584E-04		
	Total	.106	68			

Octobre

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TSA	Between Groups	7.036E-02	22	3.198E-03	1.190	.302
	Within Groups	.124	46	2.688E-03		
	Total	.194	68			

Novembre

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TSA	Between Groups	1.308E-02	22	5.946E-04	.990	.494
	Within Groups	2.763E-02	46	6.006E-04		
	Total	4.071E-02	68			

Décembre

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TSA	Between Groups	1.410E-02	22	6.407E-04	1.770	.091
	Within Groups	8.326E-03	23	3.620E-04		
	Total	2.242E-02	45			

## ANNEXE B (suite)

Tableau d'analyse de variance : Comparaison du NDVI des 23 villages du Fakara en Avril

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NDVI	Between Groups	82.290	22	3.740	.852	.650
	Within Groups	202.000	46	4.391		
	Total	284.290	68			

Tableau d'analyse de variance : Comparaison du NDVI des 23 villages du Fakara en mai

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NDVI	Between Groups	247.217	22	11.237	3.916	.000
	Within Groups	132.000	46	2.870		
	Total	379.217	68			

Tableau d'analyse de variance : Comparaison du NDVI des 23 villages du Fakara en juin

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NDVI	Between Groups	198.667	22	9.030	6.424	.000
	Within Groups	64.667	46	1.406		
	Total	263.333	68			

Tableau d'analyse de variance : Comparaison du NDVI des 23 villages du Fakara en Juillet

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NDVI	Between Groups	1891.913	22	85.996	2.501	.004
	Within Groups	1582.000	46	34.391		
	Total	3473.913	68			

**Tableau d'analyse de variance : Comparaison du NDVI des 23 villages du Fakara en Aout**

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NDVI	Between Groups	2627.913	22	119.451	2.117	.016
	Within Groups	2596.000	46	56.435		
	Total	5223.913	68			

**Tableau d'analyse de variance : Comparaison du NDVI des 23 villages du Fakara en Septembre**

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NDVI	Between Groups	2296.000	22	104.364	3.798	.000
	Within Groups	1264.000	46	27.478		
	Total	3560.000	68			

**Tableau d'analyse de variance : Comparaison du NDVI des 23 villages du Fakara en Octobre**

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NDVI	Between Groups	2081.536	22	94.615	.689	.826
	Within Groups	6314.667	46	137.275		
	Total	8396.203	68			

**Tableau d'analyse de variance : Comparaison du NDVI des 23 villages du Fakara en Novembre**

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NDVI	Between Groups	525.739	22	23.897	1.212	.285
	Within Groups	907.333	46	19.725		
	Total	1433.072	68			

Tableau d'analyse de variance : Comparaison du NDVI des 23 villages du Fakara en  
 Décembre

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NDVI	Between Groups	271.739	22	12.352	1.157	.365
	Within Groups	245.500	23	10.674		
	Total	517.239	45			

## ANNEXE C : Données de masse végétale des unités géographiques<sup>1</sup>

UG	S	F	J	C	MILTOY	MILGRY	EVBHY	EVBMY
K10	.0	.0	2.0	8.0	981.0	188.0	741.0	237.0
NM6	.0	.0	2.0	8.0	981.0	188.0	810.0	196.0
NM4	.0	.0	.0	10.0	785.0	144.0		301.0
KA8	6.0	2.0	.0	2.0	1103.0	220.0	113.0	186.0
TT2	.0	.0	4.0	6.0	1234.0	249.0	434.0	196.0
KA1	.0	.0	3.0	7.0	851.0	159.0	570.0	184.0
TK2	2.0	2.0	2.0	4.0	1234.0	249.0	811.0	261.0
KA6	.0	.0	4.0	6.0	1841.0	414.0	466.0	179.0
KA1	5.0	2.0	.0	3.0	1674.0	357.0	139.0	196.0
KA4	.0	.0	3.0	7.0	2453.0	576.0	1060.0	156.0
KA1	.0	1.0	4.0	5.0	1281.0	272.0	510.0	208.0
KA5	.0	.0	4.0	6.0	1169.0	234.0	1039.0	169.0
TT3	.0	.0	7.0	3.0	1042.0	204.0	604.0	278.0
TK1	.0	.0	7.0	3.0	981.0	188.0	591.0	186.0
TK6	.0	.0	4.0	6.0	1234.0	249.0	1065.0	201.0
TK7	.0	.0	4.0	6.0	1169.0	234.0	1097.0	219.0
BZ2	.0	.0	6.0	4.0	1234.0	249.0	1033.0	219.0
K22	.0	.0	4.0	6.0	916.0	173.0	535.0	251.0
KA1	.0	.0	1.0	9.0	1425.0	294.0	481.0	168.0
TT2	.0	.0	2.0	8.0	1360.0	280.0	555.0	161.0
TT3	.0	.0	4.0	6.0	1164.0	237.0	466.0	180.0
TT1	.0	.0	7.0	3.0	1033.0	208.0	438.0	166.0
TA1	.0	.0	7.0	3.0	1234.0	249.0	871.0	167.0
TT1	.0	.0	7.0	3.0	785.0	144.0	372.0	186.0
TT1	.0	.0	4.0	6.0	1098.0	222.0	681.0	196.0
GY9	.0	.0	3.0	7.0	851.0	159.0	619.0	184.0
GY7	.0	1.0	6.0	3.0	1098.0	222.0	638.0	186.0
TT3	.0	.0	4.0	6.0	851.0	159.0	614.0	199.0
TT2	.0	.0	8.0	2.0	1033.0	208.0	603.0	169.0
TZ2	.0	.0	7.0	3.0	851.0	159.0	644.0	196.0
TZ1	.0	1.0	6.0	3.0	851.0	159.0	876.0	205.0
TZ1	.0	.0	9.0	1.0	720.0	130.0	707.0	152.0
TT2	.0	.0	7.0	3.0	1033.0	208.0	604.0	175.0

UG: Unité géographiques; S : sol nu; F : Friches; J : Jachères; C : Champs

MILGRY : Masse de grains de mil ; MILTOY : Masse végétale totale de chaume de mil

EVBHY : Masse végétale des parcours ; EVBMY : Masse végétale des mauvaises herbes des champs

N.B : les unités de masse végétale sont en kilogramme de matière sèche par hectare (KG. MS/ ha)

<sup>1</sup> Ces unités sont celles dont la superficie est supérieure à 1 km<sup>2</sup>

**ANNEXE D : LANDSAT 7**

**Landsat 7 and ETM+ Characteristics:**

Band Number	Spectral Range(microns)	Ground Resolution(m)
1	.45 to .515	30
2	.525 to .605	30
3	.63 to .690	30
4	.75 to .90	30
5	1.55 to 1.75	30
6	10.40 to 12.5	60
7	2.09 to 2.35	30
Pan	.52 to .90	15

<b>Swath width:</b>	185 kilometers
<b>Repeat coverage interval:</b>	16 days (233 orbits)
<b>Altitude:</b>	705 kilometers
<b>Quantization:</b>	Best 8 of 9 bits
<b>On-board data storage:</b>	~375 Gb (solid state)
<b>Inclination:</b>	Sun-synchronous, 98.2 degrees
<b>Equatorial crossing:</b>	Descending node; 10:00am +/- 15 min.
<b>Launch vehicle:</b>	Delta II
<b>Launch date:</b>	April 1999



## Liste des tableaux

N°	Titre du Tableau	Page
1.1	Effectifs du cheptel des pays du CILSS - Evaluation 1998	7
2.1	Les sous climats du Niger	27
2.2	Principales Productions Agricoles au Niger : Production (Tonnes)	30
2.3	Superficies des principales cultures (ha)	31
2.4	Occupation des sols du site de Kodey de 1992 à 1996 en %	43
3.1	Caractéristiques spectrales de bandes de NOAA – AVHRR	48
3.2	Données AVHRR	49
3.3	Les indices de végétation	52
3.4	Caractéristiques géographiques des transects et polygones en degrés décimaux	62
3.5	Paramètres de la ligne des sols sur la zone invariante	68
4.1	Sites d'étude de l'évolution saisonnière des indices	73
4.2	Paramètres statistiques du TSAVI de 1998 au NIGER d'avril à décembre	75
4.3	Paramètres statistiques du NDVI de 1998 au NIGER d'avril à décembre	75
4.4	Les sols du Niger dans la région du Fakara	86
4.5	Statistiques descriptives des deux indices par type de sol de la zone du FAKARA en 1998	87
4.6	Statistiques descriptives des deux indices par type de sol de la zone du FAKARA en 1998	87
4.7	Statistiques descriptives des réflectances dans le rouge et le proche infra rouge des différents types de sols	92
4.8	Matrice de confusion de la classification supervisée du NDVI	97
4.9	Indice de Kappa de la classification supervisée du NDVI	97
4.10	Matrice de confusion de la classification supervisée du TSAVI	98
4.11	Indice de Kappa de la classification supervisée du TSAVI	98
5.1	Corrélation entre les différentes masses végétales et les synthèses de NDVI	123
5.2	Corrélation entre les différentes masses végétales et les synthèses de NDVI dans les champs	124
5.3	Corrélation entre les différentes masses végétales et les synthèses de NDVI, dans les jachères	125
5.4	Corrélation entre les différentes masses végétales et les synthèses de NDVI, dans les zones mixte	126
5.5	Corrélation entre les différentes masses végétales et les synthèses de TSAVI pour les unités géographiques	128
5.6	Corrélation entre les différentes masses végétales et les synthèses de TSAVI dans les champs	130
5.7	Paramètres du modèle champ	133
5.8	Résultats du Cross validation	135

## Liste des graphiques

N°	Titre du graphique	Page
2.1	Synthèse climatique du Niger ( source : FAO, GIEWS)	26
2.2	Evolution des superficies au Niger	31
2.3	Evolution des rendements au Niger	32
2.4	Evolution de l'occupation des sols 1992 et 1994 des 3 sites du Fakara	44
3.1	Profils Temporels des points invariants du Niger de 1990, 1991, 1992, 1993,1995, 65	65
3.2	Profil de la réflectance de la zone invariante du Niger dans le canal rouge et le proche infra rouge en 1998	66
3.3	Evolution du NDVI dans la zone Invariante	67
3.4	La ligne des sols déterminée sur la zone invariante du Niger en 1998	69
3.5	La Ligne des sols déterminée sur le mois d'avril 1998 au Niger	70
4.1	Evolution décadaire du TSAVI des 23 villages du Fakara d'avril à décembre 1998	76
4.2	Evolution décadaire du NDVI des 23 villages du Fakara d'avril à décembre 1998	76
4.3	Profil moyen du NDVI des deux senseurs	78
4.4	Relation NDVI SPOT VEGETATION et NDVI NOAA AVHRR	78
4.5	Test de sensibilité du TSAVI aux sols	82
4.6	Test de sensibilité du NDVI aux sols	82
4.7	Profil NDVI des sols	90
4.8	Profil TSAVI des sols	90
4.9	Comparaison des profils des sols dans le canal rouge	92
4.10	Comparaison des profils des sols dans le canal proche infra rouge	93
5.1	Relation entre la masse des mauvaises herbes et l'intégrale du NDVI pour l'ensemble des unités géographiques.	121
5.2	Evolution décadaire du coefficient de Pearson entr eles mauvaises herbes et l'intégrale du NDVI pour l'ensembles unités	121
5.3	Relation entre masse en grains et chaumes de mil pour l'ensemble des unités géographiques.	122
5.4	Evolution du coefficient de Pearson de la masse en grain du mil et la chaume de mil avec le NDVI décadaire (ensemble)	122
5.5	Evolution du coefficient de Pearson d'avril à Septembre pour différentes masses végétales en relation avec le TSAVI	127
5.6	Evolution du coefficient de Pearson des masses végétales en relation avec le TSAVI dans les champs	129
5.7	Evolution du coefficient de Pearson pour les masses végétales avec le TSAVI dans les zones mixtes	130

## Liste des cartes

N°	Titre de la carte	Page
2.1	Situation géographique du Niger	24
2.2	Densité de la population au Niger selon le recensement de 1988	25
2.3	Position du FIT en Juillet 2000 (source :Agrhymet) 26	26
2.4	Zone dite pastorale au Sahel	34
2.5	Le Fakara	37
2.6	Les Unités géographiques et la photographie aérienne de 1996 du Site de Kodey 42	42
2.7	L'occupation des sols du site de Kodey en 1996	44
2.8	Aptitude des sols du Fakara	45
3.1	Zones et transects invariants des pays du CILSS	63
3.2	Zone du Niger où la réflectance dans le canal rouge est supérieure à 40%	66
4.1	Les sols du Niger présents dans le FAKARA	88
4.2	Classification supervisée du NDVI	99
4.3	Classification supervisée du TSAVI	99
5.1	Zone d'étude de la biomasse	116
5.2	Début de la saison de croissance de la végétation	119