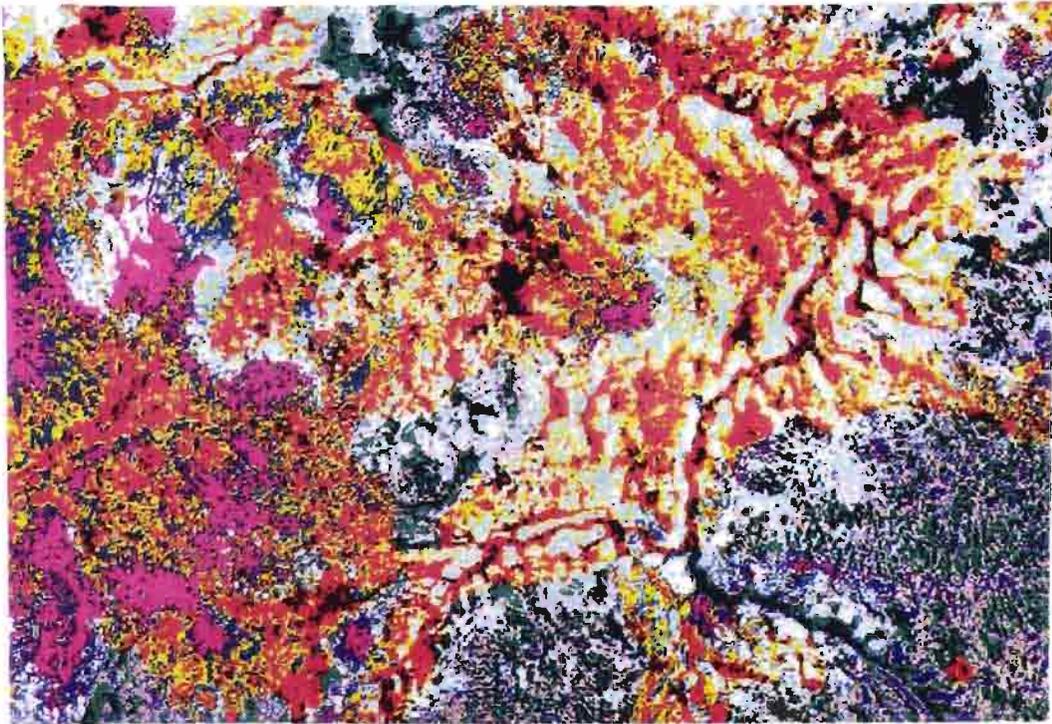


ORSTOM MAA 3G PROGRAMME DSAP ET PROG. SALT
ENGREF PROG. SALT

**CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES VEGETALES
AU NORD YATENGA (BURKINA FASO).**

UNE METHODOLOGIE D'ANALYSE MULTIDATE POUR DES IMAGES SPOT
DE DEBUT ET DE FIN DE SAISON DES PLUIES
EN ZONE SOUDANO-SAHELJENNE.



G.SERPANTIE, L.TEZENAS DU MONTCEL, (ORSTOM 3G)
S.SABATIER (ENGREF/SALT MONTPELLIER)
DECEMBRE 1991.

**ORSTOM MAA 3G PROGRAMME DSAP ET PROG. SALT
ENGREF PROG. SALT**

**CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES VEGETALES
AU NORD YATENGA (BURKINA FASO).**

**UNE METHODOLOGIE D'ANALYSE MULTIDATE POUR DES IMAGES
SPOT
DE DEBUT ET DE FIN DE SAISON DES PLUIES
EN ZONE SOUDANO-SAHELIEENNE.**

**G.SERPANTIE, L.TEZENAS DU MONTCEL, (ORSTOM 3G)
S.SABATIER (ENGREF/SALT MONTPELLIER)
DECEMBRE 1991.**

PLAN

Préambule

1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

- 1.1 Objectifs
- 1.2 Cartographie recherchée

2. MATERIEL, METHODES ET PRINCIPES DE CARTOGRAPHIE

- 2.1 Données SPOT
- 2.2 Mesure des pluies
- 2.3 Suivi des milieux herbacés au sol.
- 2.4 Caractérisation de la végétation ligneuse et de sa phénologie.
 - 2.4.1 Les relevés floristiques
 - 2.4.2 La phénologie
 - 2.4.3 Calcul de l'indice de recouvrement actif des ligneux.
- 2.5 Les transects
- 2.6. Observations de terrain.

3. ANALYSE, RESULTATS ET DEFINITION D'UNE STRATEGIE DE TRAITEMENT D'IMAGES.

- 3.1 La pluviométrie et ses conséquences sur la végétation
 - 3.1.1. Fin de la saison sèche 87
 - 3.1.2. Saison des pluies 1987
 - 3.1.3. Fin de la saison sèche 88.
- 3.2 Résultats du suivi des milieux herbacés.
 - 3.2.1. NDVI, biomasses et humidités
 - 3.2.2 Discrimination des types de végétation herbacée.
 - Début de saison humide
 - Fin de la saison humide 87
 - Début de la saison humide 1988.
 - Conclusion
 - 3.2.3 Cultures.
 - 3.2.4 Sols nus.
 - 3.2.5 Stratégie de différenciation des végétations.
- 3.3 Suivi de la végétation ligneuse.
- 3.4 Conclusion

4. PLAN D'ANALYSE DES IMAGES

5. ANALYSE D'IMAGE ET CARTOGRAPHIE

- 5.1. Cartographie du thème ligneux
- 5.2 Superposition des deux images 5/7/88 et 4/10/87.
- 5.3 Classification radiométrique
 - 5.3.1 Définition et analyse de zones d'entraînement
 - Fortes valeurs du NDVI
 - Faibles valeurs du NDVI
 - Conclusion
 - 5.3.2 Classification
 - Classification par "hypercube"
 - 5.3.3 Cartographie des types de végétation.

6. VALIDATION DU MODELE DE CLASSIFICATION

- 6.1 Matrice de confusion sur zones d'entraînement
- 6.2 Validation sur transects
 - 6.2.1. Validation du thème "ligneux" (figure 22).

- 6.2.2. Validation du thème "herbacées".
- 6.2.3. Validation du thème "densité du couvert herbacé"
- 6.2.4. Validation du thème "granulométrie des sols nus"
- 6.3 Analyse des relations entre radiométrie et strate herbacée.
 - 6.3.1. Principe
 - 6.3.2. Ajustements statistiques :
 - 6.3.3. Discussion
- 6.4. Confrontation avec des cartes de même résolution spatiale.
- 6.5 Conclusion

7. CARTOGRAPHIE DES ZONES "HUMIDES" DES REGIONS GRANITIKUES ET SCHISTEUSES.

- 7.1 Objectifs
- 7.2 Méthode
- 7.3 Traitement des images
- 7.4 Description de l'image traitée
 - 7.4.1. Les bas-fonds linéaires.
 - 7.4.2. Les "têtes de bas-fond".
 - 7.4.3. les microendoréismes

8. CONCLUSION

Préambule

Ce présent rapport est un produit du Programme ORSTOM MAA3G "Dynamique des systèmes agro-pastoraux en zone soudano-sahélienne" . Il contribue à l'initiation du programme en réseau "*SAvanes au Long Terme*" sur le site de BIDI-BANH, région où collaborent dans différents programmes de recherche et de recherche-développement l'ORSTOM, l'INERA, le LERTS, le CIRAD et l'ENGREF.

La présente étude porte sur une petite région du Burkina Faso, dans le Nord de la province du Yatenga.

Laboratoires et chercheurs associés :

ORSTOM LIA : Catherine MERING (ORSTOM 3G)

ENGREF MONTPELLIER : Pierre COUTERON

Unité informatique de ORSTOM MONTPELLIER

Unité télédétection ORSTOM MONTPELLIER

François GUILLET , stagiaire pédologue IRAT

LERTS : François LAVENU

Formation : Ignace OUEDRAOGO, de l'INERA (Burkina Faso)

Cette opération finalise d'une part l'opération de télédétection qu'a menée l'ORSTOM conjointement avec le LERTS sur les "Rythmes biologiques des savanes soudano-sahéliennes" qui a donné lieu à un document de travail et plusieurs publications (Cf p.2). Celle-ci s'inscrivait elle-même dans le programme "Dynamique des systèmes agro-pastoraux en zone soudano-sahélienne" et avait en particulier pour but de rechercher les bases théoriques d'une méthode de cartographie de la végétation soudano-sahélienne, à différentes échelles.

D'autre part, cette opération initie le programme SALT sur le site BIDI-BANH, qui se propose de poursuivre sur la même région et en coordination avec les autres sites du programme, l'approche de la dynamique écologique des savanes de l'Ouest Africain selon deux orientations : recherche de mécanismes et spatialisation des processus. Pour SALT, l'opération de télédétection a pour but de venir en aide à la réalisation d'une pré-cartographie de la région considérée, dans les domaines de la morphopédologie et de la végétation.

Nous disposons d'images SPOT acquises en commun avec le LERTS lors du précédent programme. En outre des observations au sol (caractérisation des surfaces, suivis phénologiques et radiométriques) ont été effectués en 86 et 87 sur transects et sites-test.

Les premiers traitements effectués ont été réalisés par SERPANTIE et DEVINEAU au LIA à BONDY sur logiciel PLANETES : calcul de néocanaux (brillance, NDVI), classifications par seuillage du NDVI sur image du 5/7/88 pour la caractérisation des peuplements ligneux et des bas-fonds, classifications statistiques multispectrales. Un premier travail de tri morphologique a été appliqué par C.MERING sur l'image NDVI seuillée afin d'analyser la structure spatiale de l'image sur quelques typons significatifs et isoler les structures connexes qui correspondent aux zones humides. La reprise de l'opération en 91 vise à finaliser avec la collaboration de l'ENGREF, les différents travaux de terrain de TEZENAS DU MONTCEL et SERPANTIE, en établissant une cartographie des ressources en végétation.

Calendrier 1991 :

- 15/4 au 15/6 :

- Analyse multirate : ORSTOM/ENGREF
- Stage : IGNACE OUEDRAOGO (INERA Burkina)
- Encadrement : L.TEZENAS du MONTCEL, S.SABATIER,
P.COUTERON, G.SERPANTIE, F.GUILLET.

- 15/6 au 15/7 : tournée de terrain de caractérisation morphopédologique et phytoécologique (OUEDRAOGO I., OUEDRAOGO P., GUILLET F., COUTERON P.)

-15/7 au 15/10 : Restitution cartographique et rapports.

Documents publiés :

AMAN (A.), LAVENU (F.), PODAIRE (A.), SAINT (G.), MENAUT (J.C.), PUYRAVAUD (J.Ph.), MERSADIER (G.), SERPANTIE (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L.). 1989. Etude de la production primaire de différentes savanes. Apport des images à haute résolution SPOT XS et LANDSAT TM. in Bul. S.F.P.T n°114 (2) p 40-44.

AMAN (A.), LAVENU (F.), PODAIRE (A.), SAINT (G.), MENAUT (J.C.), PUYRAVAUD (J.Ph.), MERSADIER (G.), SERPANTIE (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L.). 1989 Biological rhythms of the sudano-sahelian vegetation types. 30 p + annexes multigraph..

SERPANTIE (G.), MERSADIER (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L). 1989

Etude diachronique de la végétation en zone soudano-sahélienne.

Suivi de zones sensibles au Yatenga (Burkina Faso).

Document de travail ORSTOM. multigraph. 163 p + annexes.

DEVINEAU (J.L.), SERPANTIE (G.) 1991 : Projet SALT . Paysages végétaux et systèmes agraires au Burkina Faso. in "Caractérisation et suivi des milieux terrestres en région aride et tropicale" col. ORSTOM "Colloques et séminaires" pp 373-386.

1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

1.1 Objectifs

La région soudano-sahélienne du Burkina subit une sécheresse accusée depuis une vingtaine d'années. De nombreux auteurs ont mis en évidence une dégradation de la végétation et des sols (BOUDET, 1972 ; GROUZIS, 1987 ; MARCHAL, 1983), conséquente pour une grande part d'une surexploitation agro-sylvo-pastorale en période de déficit pluviométrique durable. La végétation était constituée de savanes arbustives et de brousses nord-soudaniennes dans les années 50. Actuellement, elle a souvent une allure irrégulière, contractée. Elle se partage entre des surfaces réduites où les végétations ligneuses et herbacées sont abondantes et des zones dénudées ou d'apparence steppique (végétation ligneuse raréfiée et en mauvais état, tapis herbacé discontinu).

Cette végétation est considérée pour l'éleveur (et donc le pastoraliste) comme un disponible fourrager. Pour l'agriculteur (et donc l'agronome), la végétation non cultivée sert de révélateur aux qualités des différents milieux. La végétation cultivée (cultures, jardins, vergers...) et celle qui est induite par la mise en culture (friches, zones érodées...) sert de repère au géographe pour connaître les modes d'utilisation des terrains, actuels ou passés.

Avec les difficultés de subsistance de ces deux décennies, la société agro-pastorale s'est considérablement appauvrie. Les troupeaux de bovins ont diminué, remplacés souvent par des caprins mieux adaptés à un pâturage herbacé raréfié. Les agriculteurs ont vendu leurs attelages et leur matériel. Cette décapitalisation générale conduit à une raréfaction des ressources financières qui entraîne à son tour une raréfaction de l'usage d'intrants.

Peu encadré sur un plan économique (ni subventions, ni crédits de campagne, ni commercialisation à prix garanti), le système de production, pour partie, se resserre sur l'exploitation des ressources du terroir. L'autre part de la production s'acquiert au dehors du territoire villageois (orpaillage, migrations dans les zones soudaniennes) ou par un accroissement d'activités commerciales ou artisanales.

Cette exploitation actuelle du terroir se traduit par des mises en culture plus "extensives", l'entretien d'un troupeau à forte dominante de caprins, mais aussi un aménagement de certains milieux cultivés.

C'est dans ce contexte que le programme "Dynamique des systèmes agro-pastoraux" se donne pour but de préciser les modes actuels d'exploitation des ressources agro-pastorales et d'identifier en particulier la nature et la localisation de celles-ci. Il s'agit aussi de comparer le milieu avec un état ancien (années 50) et de constituer une base de connaissance pour un suivi futur.

L'objectif est donc de mettre en oeuvre une cartographie des ressources végétales sur une base numérique, permettant éventuellement de procéder à des comparaisons et des statistiques. Une telle carte doit s'avérer utilisable tant par l'agronome, le pastoraliste, que le géographe ou l'écologue.

1.2 Cartographie recherchée

Compte tenu de l'aspect contracté et pointillé qu'a pris la végétation, l'échelle de travail doit être grande, pour une définition aussi fine que possible. Pour concilier à la fois les qualités de synthèse que doit revêtir une cartographie et la finesse de définition que requiert le rendu d'une végétation contractée, il nous a paru que l'échelle de travail ne pouvait excéder 1/40000 et la définition 20*20m. C'est la résolution des images SPOT. Les images LANDSAT TM, testées en 1988, dont le pixel est de 30*30 m ne rendent pas compte de structures de végétation habituelles en zone soudano-sahélienne, telles que celle de la brousse tigrée. La résolution radiométrique de Landsat TM est bien meilleure, mais la nature de la végétation soudano-sahélienne (grand nombre d'espèces ubiquistes, faible extension spatiale des faciès de végétation, hétérogénéité des terrains) permet de prévoir qu'une grande résolution radiométrique n'est pas indispensable.

Les thèmes cartographiques concernant la végétation sont nombreux : physiologique, écologique et fonctionnel lorsque la végétation est directement le produit d'activités humaines (cultures, jachères, parcs, parcours...).

En zone soudano-sahélienne, il est souvent possible de faire des correspondances entre ces thèmes lorsque l'on connaît les liens entre le paysage morphopédologique et la structure de la végétation : une steppe en bas de pente sera la plupart du temps peuplée d'épineux clairsemés et de buissons bas (*Balanites aegyptiaca*, *Acacia spp*, *Guiera*

senegalensis), alors qu'en haut de pente cuirassée, elle sera plutôt peuplée de *Combretum spp*, *Guiera senegalensis*, et *Pterocarpus lucens* en mauvais état.

Aussi, une forte résolution spatiale (unité d'information de 20*20m) et des modalités élémentaires de description telles que "ligneux", "herbacé", "steppique", "sol nu" nu" peuvent être suffisants pour permettre l'extrapolation vers d'autres thèmes. Nous postulons donc que dans cette région, la cartographie à haute résolution des ressources en végétation et la cartographie morphopédologique sont des bases utiles pour produire d'autres cartes thématiques de végétation.

Nous nous attachons donc ici à produire une carte de la végétation élémentaire à forte résolution, ce que l'on nommera carte des ressources élémentaires en végétation.

2. MATERIEL, METHODES ET PRINCIPES DE CARTOGRAPHIE

2.1 Données SPOT

Nous disposons de 3 images SPOT XS multispectrales, à haute résolution spatiale (pixels de 20 x 20 m), de bonne qualité.

Les dates de prise de vue sont :

- 22 juin 1987
- 4 octobre 1987
- 5 juillet 1988

Les prises de vue ont eu lieu en début et fin de saison des pluies, périodes pendant lesquelles végétation et activités agraires évoluent rapidement, se différencient et sont en cela potentiellement caractérisables par télédétection. Ces dates méritent donc d'être mieux situées par rapport aux précipitations.

2.2 Mesure des pluies

La végétation soudano-sahélienne est sensible au profil de la pluviométrie : les herbacées, essentiellement annuelles, lèvent dès que le sol est correctement humecté, condition dont dépendent aussi les semis de céréales. Certaines espèces de ligneux sur certains terrains attendent des événements pluvieux significatifs pour débourrer ou déployer leurs feuilles (TEZENAS DU MONTCEL, 1991).

Les précipitations sont assez variables sur le plan spatial dans les conditions actuelles du climat soudano-sahélien. La quantité annuelle de pluie reçue a un coefficient de variation de 10% à l'échelle locale (au sein d'un territoire de 100 km² et 15% à l'échelle régionale (40000 km²). Cette variabilité dans les quantités cumulées s'accompagne de modes de répartition temporelle des pluies très contrastés.

Pour tenir compte de cette variabilité spatio-temporelle des pluies et des incidences possibles sur l'état de la végétation au moment des prises de vue, nous avons étudié les profils pluviométriques de trois stations de mesure distantes d'au moins 15 km entre elles, sur un axe Nord-Sud : Sulusore, Amene, Banh (figure 1).

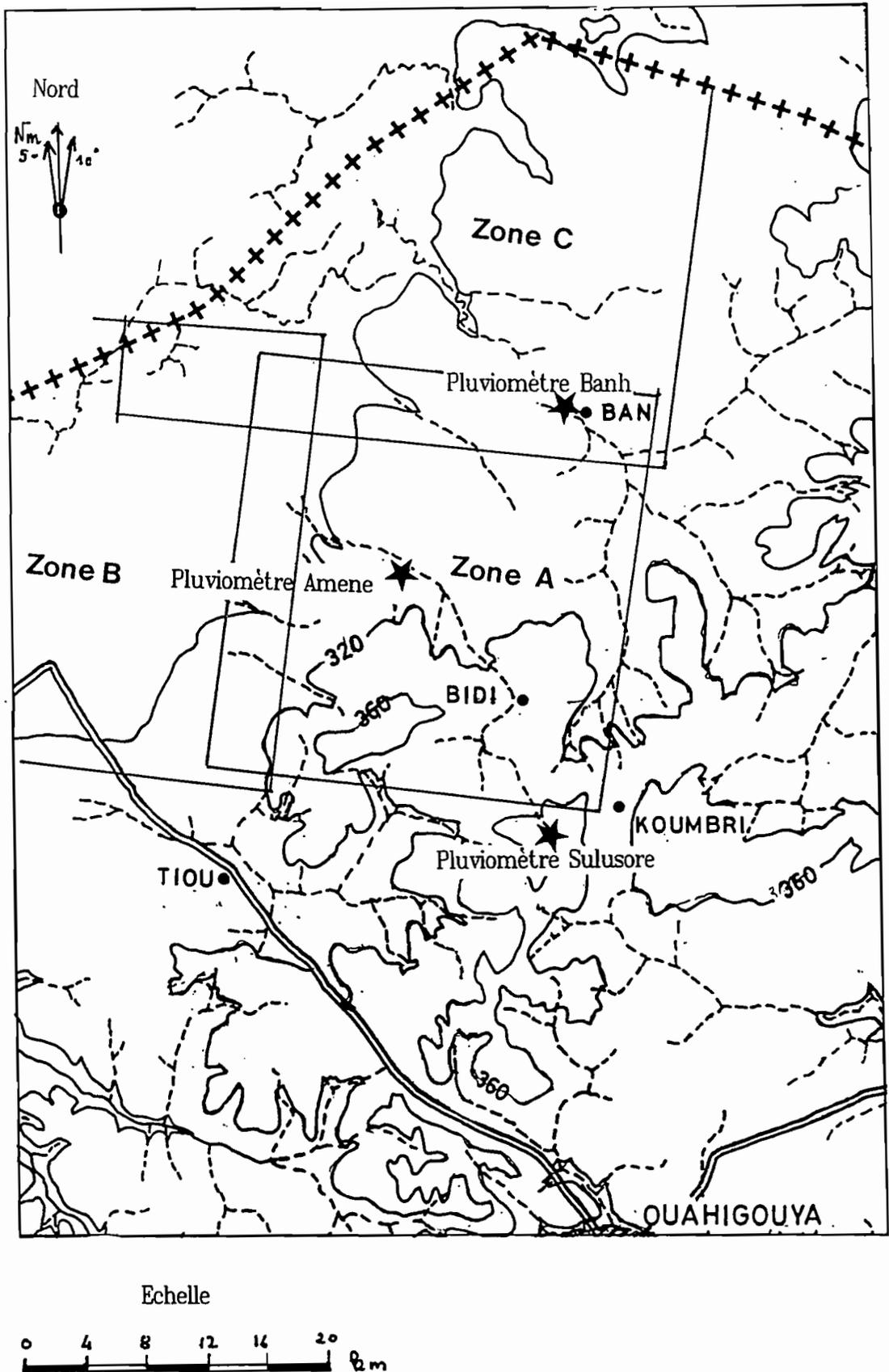


Figure 1 : Localisation des fenêtres extraites des scènes SPOT et des stations pluviométriques INERA et ORSTOM.

Le traitement des données brutes de pluviométrie emploie le programme ANAPLUIE qui est un programme d'analyse comparative simplifiée et de représentation graphique rapide d'un bilan d'eau sur une saison (SERPANTIE, à paraître). Le modèle qui soutient ce programme n'est valide que pour des sols sableux à sablo-argileux, hors bas-fond, portant des cultures ou un tapis herbacé. Le modèle simule quatre configurations de terrain, obtenues en croisant deux variables, l'épaisseur du sol et la situation dans le paysage : sol moyen (réserve utile maximum ou RUM de 100 mm), sol fin (RUM de 50 mm), avec ou sans impluvium. La sortie du modèle est une représentation graphique de l'évolution de la quantité d'eau utile du sol pour les quatre types de terrains. Le programme génère en outre un recensement des jours où le sol est considéré comme sec, engorgé, ou insuffisamment pourvu pour les besoins des plantes herbacées (figures 2 à 4).

2.3 Suivi des milieux herbacés au sol.

Le suivi de végétation herbacée et de sols nus par des mesures radiométriques dans les trois domaines de longueur d'onde XS SPOT peut nous aider à effectuer l'interprétation des images satellitaires. Des résultats précédents (SERPANTIE et al, 1989) ont en effet souligné la bonne coïncidence entre mesures satellitaires et mesure au sol, tout du moins en valeur relative. Une concordance absolue requiert de multiples correction des effets atmosphériques et d'étalonnage de capteurs.

Dans le cadre du programme précédent, "rythmes biologiques de la végétation soudano-sahélienne", avec l'aide du LERTS, nous avons mis en place un dispositif de sites-test suivis en radiométrie à 3 m à l'aide d'un radiomètre CIMEL (sites H_j).

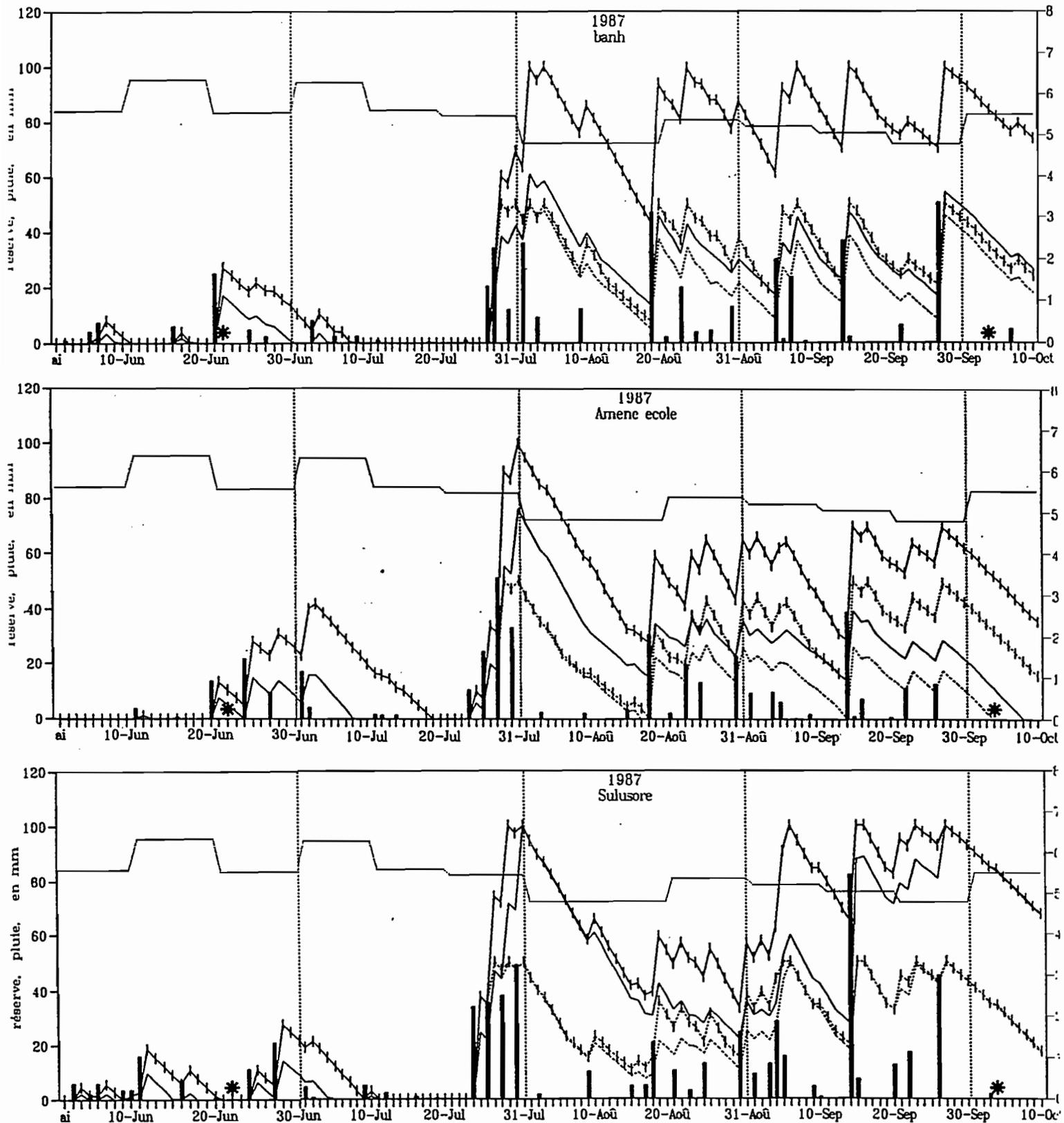
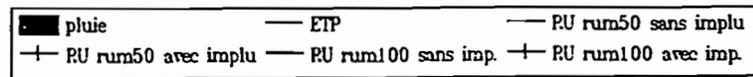
L'échantillon de sites-test offre une gamme contrastée de milieux : de la prairie monospécifique à *Zornia glochidiata* (petite légumineuse à couvert clairsemé), à la prairie dense de bas-fond (Tableau I). Le rythme des mesures est de 15 j en saison des pluies et de 1 mois en saison sèche. Les mesures sont effectuées sur quatre placettes par site, trois en végétation (dont on donnera la moyenne) et une en sol nu. A chaque date, la phytomasse herbacée (MS. ha⁻¹) est mesurée.

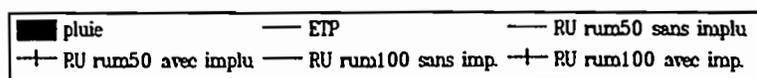
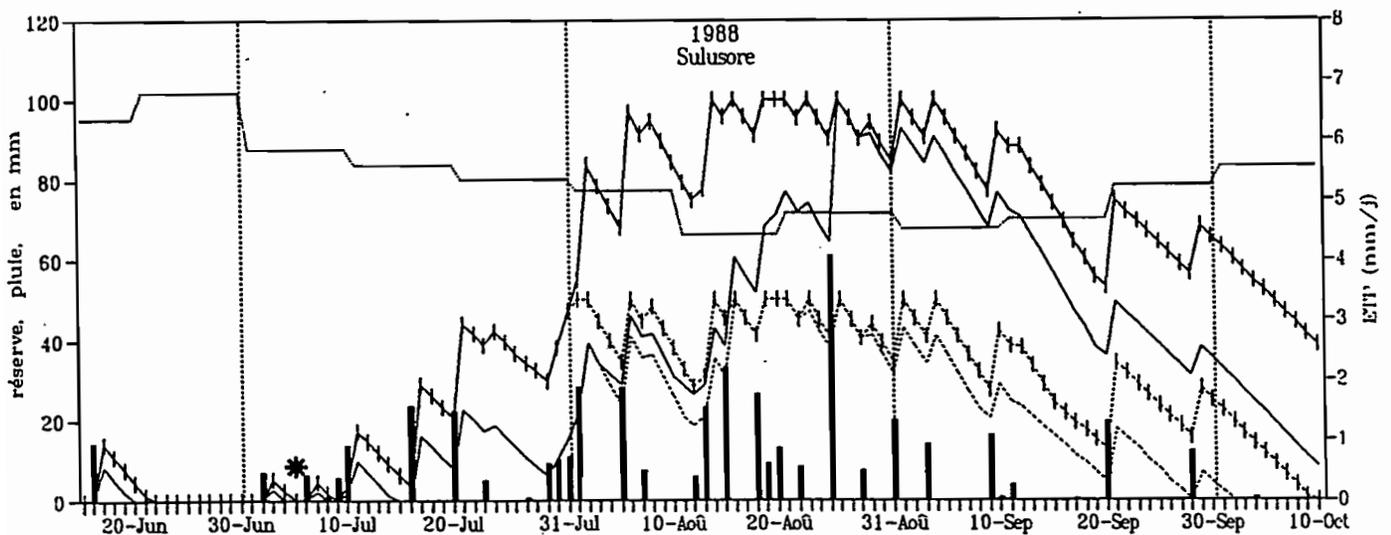
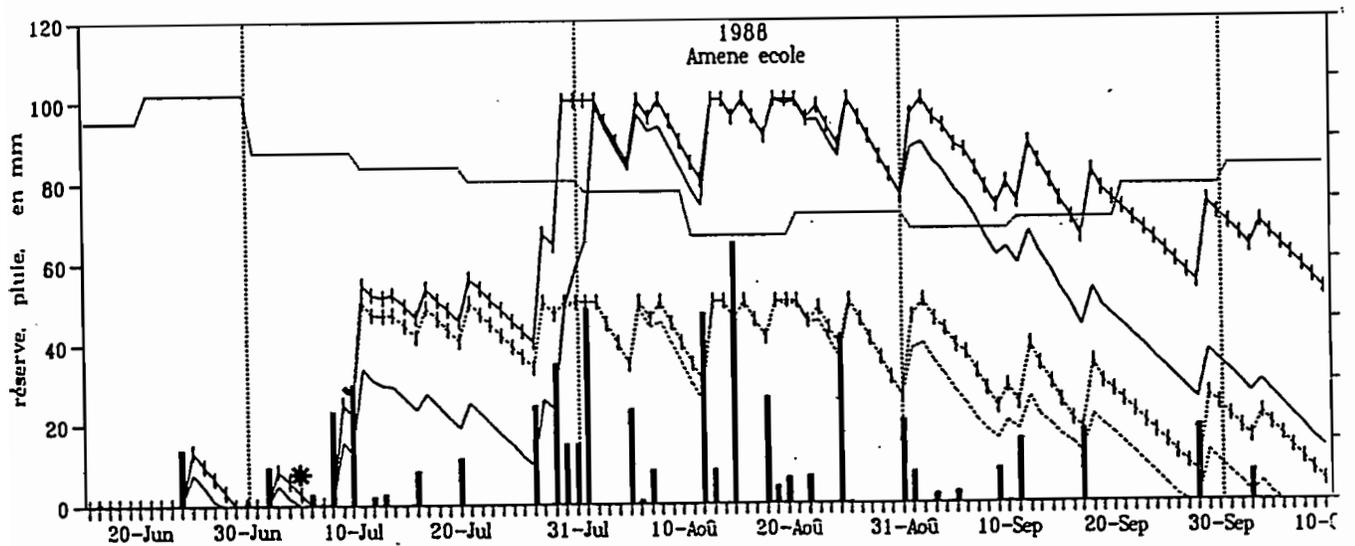
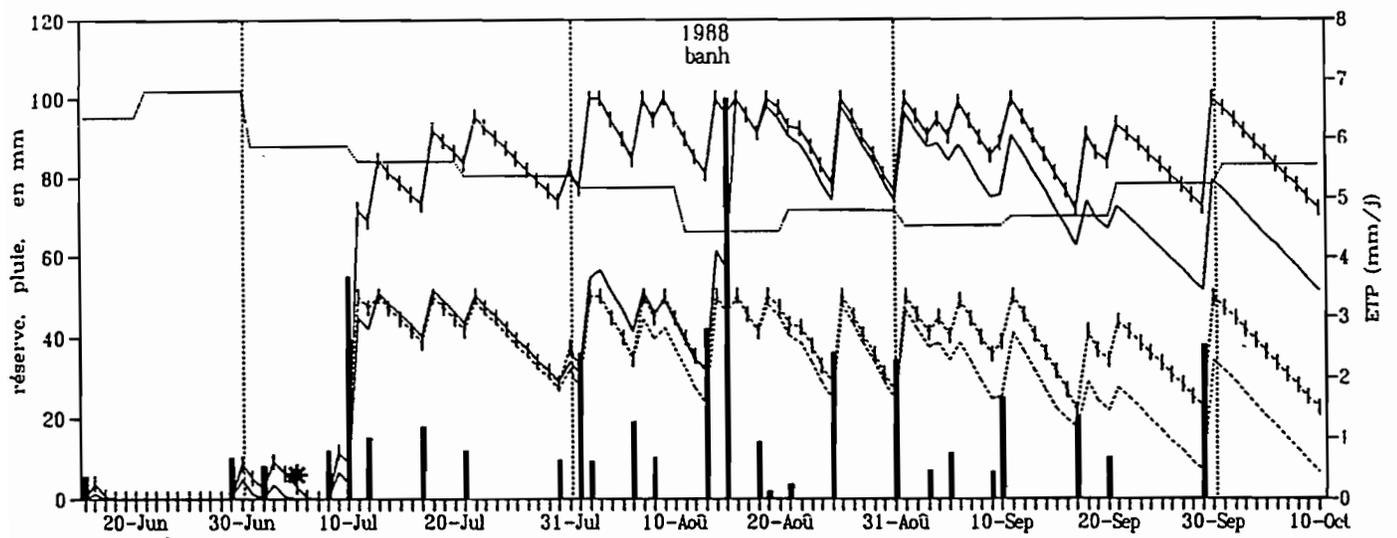
Une autre série d'observations sur milieu herbacé a été réalisée en 1988 et concerne la phénologie (stations P_j, figure 5, tableau II). La mesure du 5/7/88 permet de connaître l'état de levée de différentes espèces herbacées sur différents terrains, que l'on rapportera à l'image correspondante (tableau III).

Figure 2 : Profils des pluies et simulation de bilan hydrique sur les trois postes pluviométriques en 1987.

* : dates de prises de vue.

"RU rum50 avec imp." : Réserve utilisable pour un terrain de réserve utile maximum de 50 mm et surmonté d'un impluvium.





* : dates de prises de v

Figure 3 : Profils des pluies et simulation de bilan hydrique sur les trois postes pluviométriques en 1988.

"RU rum50 avec imp." : Réserve utilisable pour un terrain de réserve utile maximum de 50 mm et surmonté d'un impluvium.

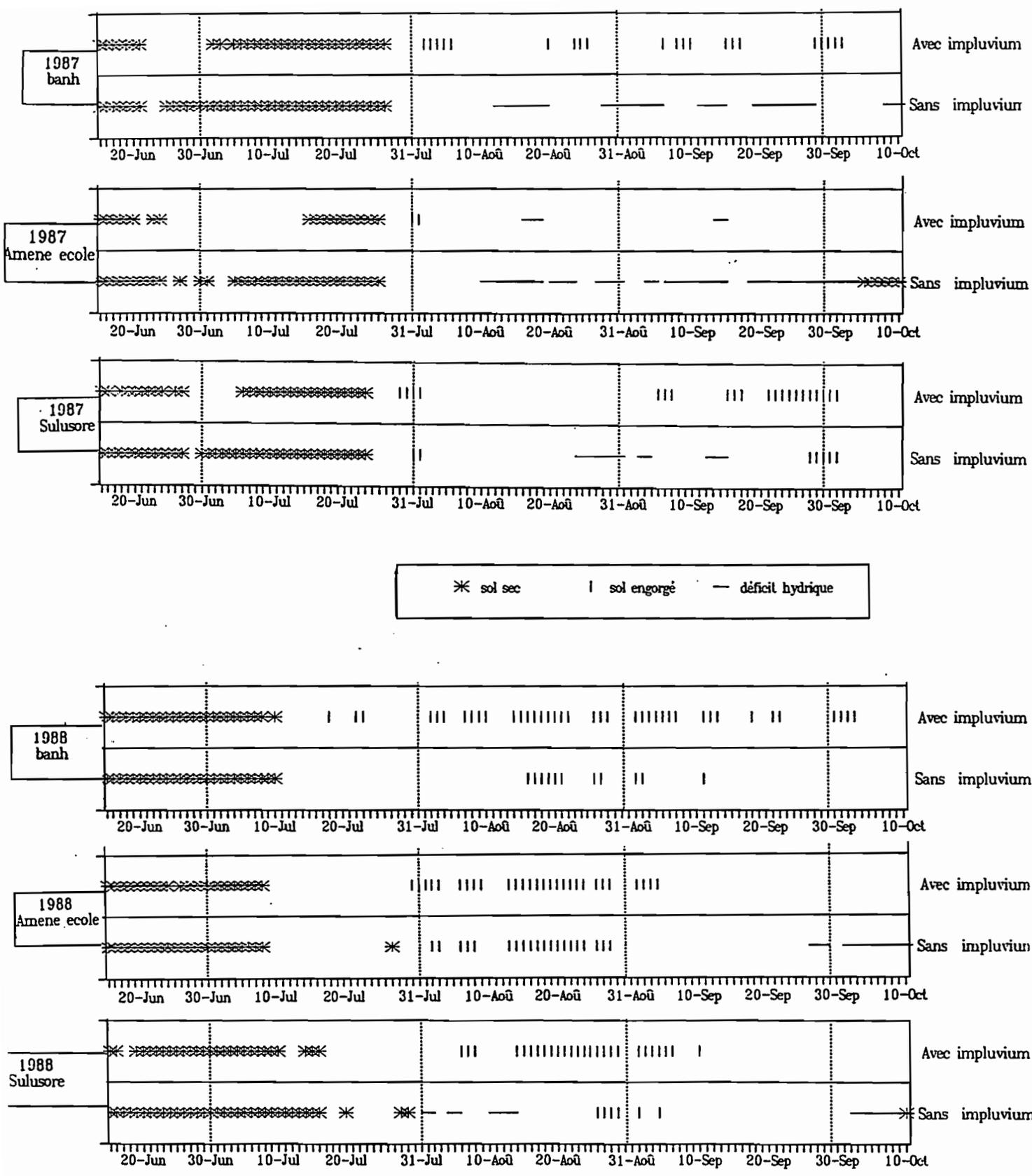


Figure 4 : Recensement des périodes sèches, à engorgement ou déficitaires en eau, pour une réserve utile maximum de 100 mm.

Tableau I : Description des sites-test H_i (radiométrie sur surfaces herbeuses et sols nus)

numéro	descriptif	toponymie
H2	Jachère de 2 ans à couvert herbacé bas (<i>Zornia glochidiata</i>)	Samni
H4	Marge érodée de placage sableux. (couvert discontinu de graminées)	Djana
H5	Prairie peu inondable de bas-fond zone du village (pâturé en saison humide)	Debere
H6	Prairie étendue sur placage sableux. (dominance d' <i>Andropogon pseudapricus</i>)	SeenoYessoo
H7	Prairie étendue de graminées sur bowal (dominance de <i>Loudetia togoensis</i>).	Tchabel
H8	Bordure herbeuse d'un fourré de brousse tigrée. Zone de colonisation.	Sulusore
H9	Prairie de bas-fond inondable.	KesselKumaredje

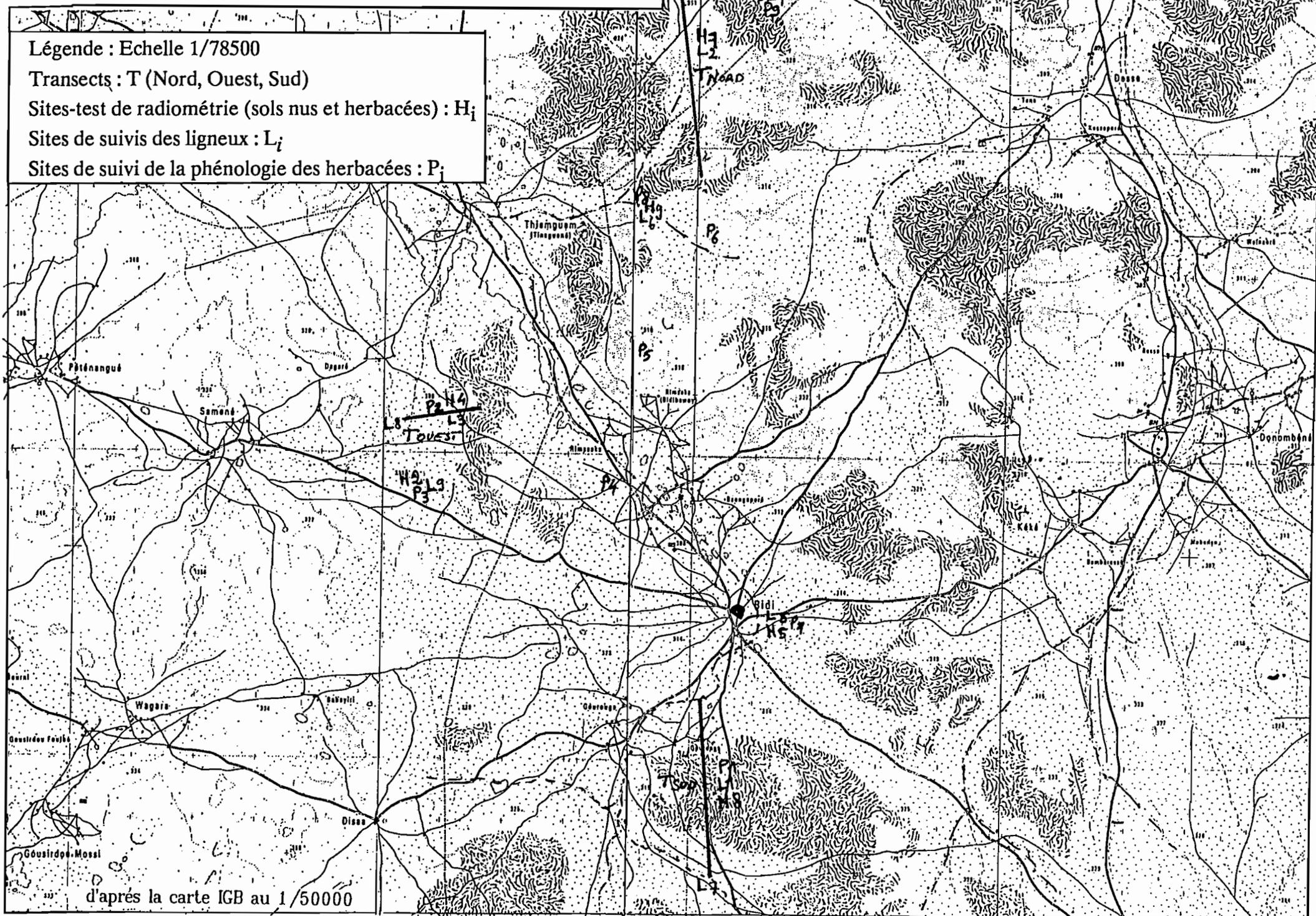
Tableau II : Description des sites de suivi de la phénologie des herbacées (P_i).

numéro	descriptif	toponymie
P1	Bosquet dense de brousse tigrée.	Sulusore
P2	Marge d'un voile sableux. Prairie discontinue	Djana
P3	Jachère sableuse récente. Prairie monospécifique à <i>Zornia glochidiata</i> .	Samni
P4	Jachère à <i>Guiera s.</i> sur thalweg secondaire	Sagarasore
P5	bosquets sur placage sableux	Fukahoh
P6	Brousse pointillée arbustif peu dense	Goulia
P7	Prairie de bas-fond secondaire (zone du village)	Debere
P8	Prairie de bas-fond secondaire (zone de brousse) à légumineuses dominantes	Niorko
P9	Prairie étendue sur sol sableux	SeenoYessoo

Tableau IV : Description des sites L_i : suivi de la phénologie des ligneux.

numéro	descriptif	toponymie
L1	Bosquet dense de brousse tigrée.	Tilli
L2	Bosquets sur bowés en tête de thalweg.	Tchabel
L3	Voile dunaire sur cuirasse à brousse peu dense	Djana
L4	Tête de thalweg à strate arbustive peu dense. Strate herbacée discontinue	Sagarasore
L5	Parc arboré et bosquets relictuels de bas-fond. strate herbacée. continue à graminées dominantes	Debere
L6	Parc arboré clair et arbustif peu dense (jachères) prairie à légumineuses	KesselKumaredje
L7	Jachère arbustive sur le bas-fond principal strate herbacée discontinue	Sulusore
L8	Parc arboré clair et arbustif peu dense de bas-fond (jachères)	Niorko
L9	Jachère de pente sableuse (Guiera senegalensis et Zornia glochidiata)	Samni

Figure 5 : Localisation des transects de suivi au sol et des sites-test.



2.4 Caractérisation de la végétation ligneuse et de sa phénologie.

Nous nous intéresserons ici à la strate ligneuse pour diverses raisons : elle donne une bonne idée du type de végétation et de l'état du milieu, son inertie biologique (comparée à la strate herbacée) permet une bonne représentation de l'évolution globale de la végétation aux moyen et long termes. D'autre part, son cycle végétatif, plus précoce et d'une durée plus longue que les espèces herbacées cultivées ou naturelles, permet de la différencier plus facilement sur des images satellitaires de début ou fin de saison sèche.

Afin de pouvoir déterminer les phases de végétation active pour les ligneux, et disposer d'un référentiel sol, un programme de caractérisation et de suivi de la végétation ligneuse a été mis en place en 1987 sur un ensemble de sites L_i (figure 5, tableau IV). Il a fonctionné jusqu'en 1989. Le but est de caractériser la végétation ligneuse par un **indice de recouvrement actif** (actif d'un point de vue photosynthèse) utilisable pour interpréter les images satellitaires de début de saison des pluies. En effet, la forte résolution spatiale de ces images et la nature contractée de la végétation ligneuse dans la région soudano-sahélienne, permet de classer chaque pixel selon la dominance de la végétation ligneuse.

Le NDVI (normalized difference vegetation index) obtenu par la différence normalisée des mesures XS3 (PIR) et XS2 (R), rend généralement bien compte de la quantité de végétation active, aux "effets de sol et d'atmosphère" près. Quand on élimine d'une image NDVI les plus basses valeurs (correspondant aux sols nus) jusqu'à un seuil correct, nous obtenons une représentation d'aspect réticulé, pointillé ou en mosaïque. Une telle image est très proche de la vision que l'on a de la végétation au sol, image impossible à rendre avec les moyens classiques de cartographie par photo-interprétation.

Nos observations de terrain sont effectuées afin que la comparaison avec le résultat de l'analyse d'image soit possible. La caractérisation du milieu au sol est donc faite à l'échelle de un ou deux hectares (soit 25 à 50 pixels), sur une zone considérée comme homogène. On recherche un taux de recouvrement de la végétation ligneuse, que l'on pourra comparer au résultats de l'analyse d'image pour optimiser cette dernière.

Diverses questions se posent pour éviter d'englober dans la strate ligneuse des espèces non arborescentes :

- quelle date devons nous retenir pour caractériser cette strate ? Quelle image devons nous traiter?

- quel seuil de NDVI devons nous utiliser pour différencier les pixels où les ligneux sont dominants ?
- comment calculer ce seuil sans mettre en oeuvre une connaissance suggestive du terrain ?
- comment utiliser nos données phytosociologiques et phénologiques afin d'établir un indice de recouvrement végétal ligneux actif (IRVL) pertinent, apte à refléter dans l'absolu les variations du recouvrement actif de cette strate ?

2.4.1 Les relevés floristiques

Le relevé floristique consiste à faire une liste exhaustive des espèces présentes en se limitant à la surface que l'on considère homogène. Un relevé a été effectué sur chaque site de suivi phénologique sur une surface d'environ un hectare. Il consiste à donner une note d'abondance-dominance à chaque espèce et à estimer le recouvrement total des strates herbacées et ligneuses.

La phénologie renseigne sur l'évolution de la densité en feuilles adultes du houppier des ligneux mais nous avons besoin des relevés floristiques pour connaître la proportion de chaque essence. Nous utiliserons donc deux types de données effectuées lors des relevés :

- cotation d'abondance-dominance (AD) par espèce qui permettra de donner une valeur médiane de recouvrement d'une espèce (VME),
- estimation visuelle du recouvrement de l'ensemble des espèces ligneuses (RSL).

Ces données sont utilisables pour établir l'IRVL pour deux raisons :

- 1°) en terme de recouvrement, les espèces dont on a suivi la phénologie représentent plus de 90% du recouvrement total.
- 2°) le relevé floristique est effectué à la même échelle spatiale que l'analyse statistique des pixels. En effet celle-ci sera effectuée sur une surface d'un ou deux hectares constitué de 25 ou 50 pixels.

2.4.2 La phénologie

Les espèces ligneuses (n=37) sont étudiées sur 9 sites : (quatre dans des bas-fonds, quatre dans des "brousses", et une sur une jachère de bas de pente (Tableau IV). Les effectifs observés par espèce varient de 5 à 15 individus par site.

Le suivi est effectué sur deux années, de juin 1987 à juin 1989. Le rythme d'observation est bimensuel en fin de saison sèche et pendant la saison humide, et mensuel en saison sèche.

Les observations consistent à noter chaque individu en fonction du développement des organes que sont les feuilles, les fleurs et les fruits. Les codes de 1 à 5 permettent de noter les différentes phases de croissance et de sénescence, le code 6 signifie l'absence de l'organe. La figure 6 illustre le phénogramme foliaire de *Combretum nigricans* sur le site 4.

Le tableau de résultat (Tableau V) que l'on utilisera est constitué de la manière suivante :

- en colonne, les dates d'observations (n=42)
- en ligne, les binômes espèces-sites (n=111).

Dans chaque cellule est mentionnée la fréquence d'individus qui possèdent des feuilles adultes vertes. Ces fréquences sont classées en 11 modalités dans un souci de clarification et de présentation des résultats : 0-5% (0), 6-15% (1), 16-25% (2), 26-35% (3), 36-45% (4), 46-55% (5), 56-65% (6), 66-75% (7), 76-85% (8), 86-95% (9), 96-100% (10). Chacune des cellules représente donc un état de verdure moyen (EV) du houppier d'un échantillon d'individus d'une espèce sur un site à une date donnée. cc

2.4.3 Calcul de l'indice de recouvrement actif des ligneux.

Par rapport à nos objectifs d'analyse d'images satellitaires, nous recherchons une combinaison de ces données qui rende compte dans l'absolu d'un pourcentage de recouvrement ligneux photosynthétiquement actif. A cette fin, nous distinguerons les recouvrements observés sur l'ensemble de la strate ligneuse (RSL), sur plusieurs individus d'une espèce dans un relevé (VME) et sur la couronne d'une espèce en pleine feuillaison (IRH). Nous précisons pour plus de compréhension que RSL et VME ne varient pas à court terme et caractérisent un faciès, et que IRH caractérise une espèce ligneuse et donc reste constant quelles que soient la saison et la station considérées.

En supposant que le recouvrement mutuel des houppiers, s'il existe, accroît d'autant la surface photosynthétique réelle et le NDVI, nous proposons l'équation suivante :

$$\text{IRVL} = \text{somme des IVE}$$

où IVE est l'indice de recouvrement photosynthétiquement actif (p.a.) d'une population monospécifique ; la somme des IVE sur un faciès est considérée comme le recouvrement p.a. de la population plurispécifique.

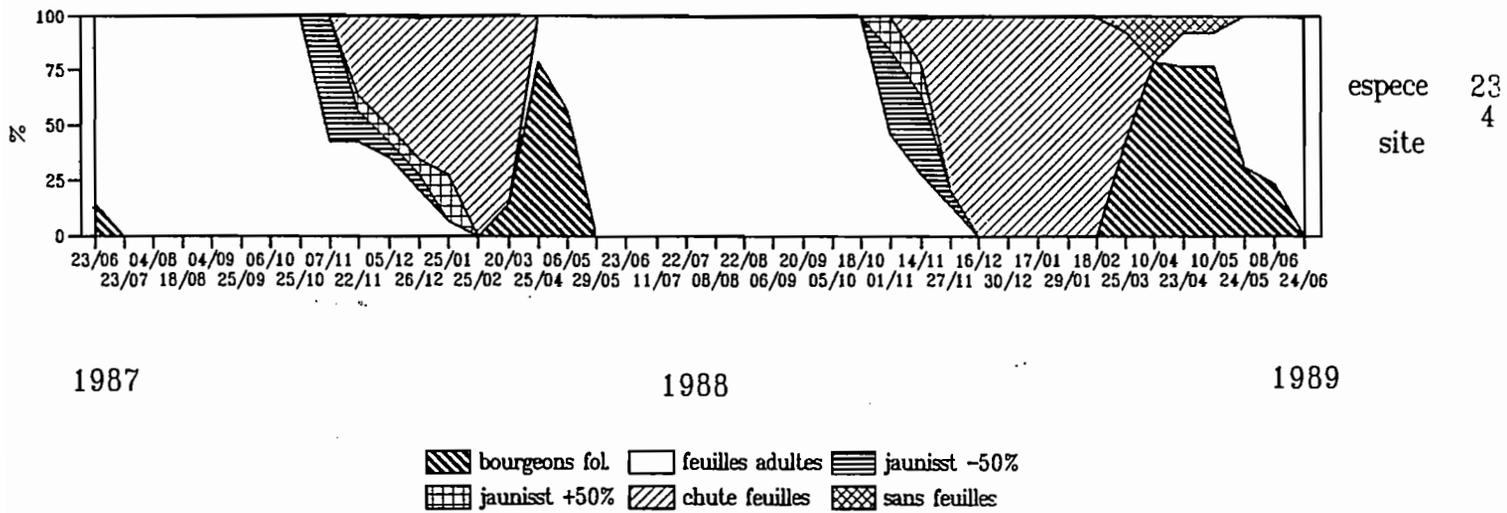


Figure 6 : Exemple de phénogramme foliaire : *Combretum nigricans* sur le site 4.

avec

$$IVE = (VME/\text{somme}VME) \times RSL \times IRH \times (EV/10)$$

où :

-VME est la valeur médiane de recouvrement de l'espèce, estimée à partir de la cotation d'abondance-dominance (AD)

-RSL est le recouvrement de la strate ligneuse estimé lors du relevé floristique.

-IRH est l'indice de recouvrement du houppier. Cet indice varie de 0.1 à 1.3 : de 0.1 à 1, il indique le pourcentage du recouvrement foliaire sur la surface de la couronne ; de 1 à 1.3, il indique que le recouvrement foliaire est total et qu'en plus il existe des superpositions plus ou moins nombreuses. Nous avons pris en compte ces superpositions car le NDVI varie aussi selon l'épaisseur d'un feuillage.

-EV est un état de verdeur moyen des houppiers d'une espèce sur une station à un moment donné.

2.5 Les transects

Ils sont destinés à servir à l'interprétation et à la validation des classes radiométriques obtenues par l'analyse d'image.

Il s'agit de trajets effectués à pied (avec boussole et en comptant le nombre de pas) sur des lignes de 1 à 3 km , si possible recoupant des zones écologiques contrastées et représentatives. On exclut ainsi les transects le long de voies de passage dont la végétation de bordure est peu représentative. Sur ces trajets, menés à des saisons différentes et au moment des prises de vue demandées, des relevés de la végétation et de l'état du milieu ont été effectués. Ces relevés caractérisent des segments considérés comme homogènes, sur une largeur variable de part et d'autre de la ligne suivie. . On note pour chacun des segments des recouvrements des différentes strates (herbacées, sols nus, ligneux) et les caractères dominants du milieu. L'état de surface du sol est aussi caractérisé dans ses grands traits (éléments grossiers et types de croûtes), de même que les espèces rencontrées lorsqu'elles marquent particulièrement la végétation (Annexe 1). Les principaux problèmes que posent ces transects sont des problèmes de repérage des segments déjà déterminés aux dates antérieures. La végétation rencontrée est parfois une végétation fermée, ce qui ne facilite ni la progression sur la ligne, ni le repérage. Enfin la détermination au sol de taux de recouvrement s'apparente souvent à une gageure dans ce type de milieu.

Trois transects considérés comme représentatifs de la diversité de la végétation ont ainsi été parcourus (figure 5) : trajet Nord, Sud et Ouest.

La visualisation de ces transects sur l'image révèle qu'aucun ne pourra servir à définir des "zones d'apprentissage" (nécessaires à la définition de classes radiométrique en mode supervisé) car les milieux traversés sont trop hétérogènes. Les "zones d'apprentissage" seront donc obtenues sur des zones jugées homogènes sur l'image et bien connues par ailleurs, au sol.

2.6. Observations de terrain.

Une cartographie, même assistée par des images satellitaires serait difficile sans la connaissance intime du terrain, que nous a procuré d'autres opérations de recherche, depuis 1984 : enquêtes culturelles, suivi de troupeaux, etc. Les "zones d'apprentissage" sont définies grâce à cette connaissance du terrain.

Nous observons aussi que les prairies naturelles étendues sans ligneux sont très rares. Ces prairies sont localisées sur des milieux très particuliers (bowés), et la plupart nous sont connues. En revanche les champs et jeunes jachères hors bas-fond portent très peu de ligneux (soit ponctuellement, soit sur des surfaces très faibles, soit ils sont sans feuilles en début de saison humide, cas de *Acacia albida*). Cette propriété contraste avec les parcs de bas-fond et les champs soudaniens, fortement arborés ("parcs à karité, à Néré, à *Acacia albida* etc). Nous nous servons de cette observation pour interpréter les milieux herbacés et séparer visuellement le groupe des "champs et jeunes jachères" (sans ligneux) du groupe des "brousses et vieilles jachères" (avec ligneux).

3. ANALYSE, RESULTATS ET DEFINITION D'UNE STRATEGIE DE TRAITEMENT D'IMAGES.

C'est par l'analyse des observations sol que l'on pourra décider d'une stratégie d'analyse d'image : tri des images, type de traitement, possibilité d'une analyse multirate, type d'approximation.

3.1 La pluviométrie et ses conséquences sur la végétation

3.1.1. Fin de la saison sèche 87

La première série de pluies significatives arrive la première décade de juin. A partir du 1er juin, jusqu'au 21 juin exclu (veille de la prise de vue), la pluviométrie totalise suivant les lieux 3 à 45 mm. Le sud (Sulusore) est favorisé (45 mm) alors que le centre (Amene)

ne reçoit que 3 mm et Banh (Nord) 16 mm. Au moment de la prise de vue (22/6/87), de nombreux ligneux n'ont pas encore émis leurs feuilles adultes, en particulier au centre de la zone, comme l'indique le suivi phénologique. Il est donc probable que cette date de prise de vue ne sera pas idéale pour repérer la végétation ligneuse puisqu'elle n'est pas encore totalement active à cette époque, et ce retard n'est pas uniforme. Le rôle de l'apport d'eau par les précipitations antérieures sur la précocité du recouvrement actif des ligneux dans les milieux "secs" est probable, puisque la feuillaison des ligneux du Sud (où il a plus plu) apparaît beaucoup plus précoce que celle du centre et du Nord, pour des types de végétation similaires.

Les bas-fonds du Sud sont enherbés, en particulier sur le trajet de crues qui sont partie de la tête du bassin versant, à l'extrême sud, le 11/6.

D'autre part, une averse de 25 mm est tombée le 21/6 seulement à Banh, ce qui peut avoir des conséquences locales sur les propriétés radiométriques des sols nus (baisse de réflectance par exemple).

A priori, nous ne pourrions donc utiliser l'image du 22/6/87 pour obtenir une image de la végétation ligneuse, mais tout au plus pour tester, compte tenu de l'hétérogénéité phénologique des ligneux et de l'absence d'herbes et de cultures, une méthode de cartographie des ligneux actifs (que nous préciserons chap. 3.3).

3.1.2. Saison des pluies 1987

Fin juin, les précipitations présentent une grande variabilité dans la région. A Gourga par exemple, la pluviométrie est dérisoire alors qu'au Nord, elle est suffisante pour provoquer une levée des herbacées annuelles dans la plupart des bas-fonds, et un épanouissement correct des feuilles de tous les ligneux. Mais la pluie s'arrête brutalement le 1er juillet et ne reprendra que fin juillet, date que l'on peut considérer comme le véritable démarrage des cultures et de la végétation herbacée. Pendant tout les mois d'août et septembre, le bilan d'eau est correct au Sud, déficitaire au Centre et surtout au Nord, ce qui peut avoir comme conséquence des difficultés pour les végétations herbacées et un raccourcissement probable des cycles phénologiques.

Le 4 octobre, la plupart des herbacées (sauf le Sorgho), sont au stade fructification mais présentent encore de la chlorophylle, grâce au mois de septembre relativement humide et au retard du début du cycle végétatif.

Mais vers le Nord, les paysans utilisent des variétés de Mil de cycle plus court qu'à Bidi adaptés à des sols plus sableux et à une saison des pluies plus courte. En outre, la fréquence des déficits a dû y avancer le stade de sénescence. Si on exclut le Nord, on peut considérer qu'à cette date l'ensemble de la région est relativement uniforme sur le plan de la phénologie des herbacées, sauf les cuvettes et bas-fonds qui sont en pleine activité photosynthétique, et les zones les plus sèches, qui ont dû perdre totalement leur activité photosynthétique. Quant aux ligneux, ils sont tous en activité à cette date.

La dernière pluie est tombée le 27 septembre dans toute la région. Tous les sols sont donc au même état superficiel d'humidité, sauf bien sûr à proximité immédiate des mares.

Il faut donc s'attendre à une hétérogénéité régionale sur l'état d'activité des cultures à la date de prise de vue ainsi qu'une forte hétérogénéité de l'état d'activité de la végétation suivant le statut hydrique. Mais comme il existe généralement une bonne relation entre ce statut et la quantité de végétation, nous pourrions sans doute exploiter cette image pour déterminer au Sud et au Centre plusieurs classes de biomasse de la végétation herbacée (naturelle ou cultivée). Pour cela il faudra au préalable traiter le couvert ligneux.

3.1.3. Fin de la saison sèche 88.

Cette année a ceci de particulier qu'une averse de l'ordre de 40 mm a eu lieu le 26 avril sur l'ensemble de la région, provoquant un verdissement des bas-fonds et de certaines prairies. La plupart des ligneux a atteint le stade "feuilles adultes" très tôt cette année.

Les pluies ne reprennent que fin juin et une seule pluie significative précède la date de prise de vue du 5/7. Un tel événement peut à la rigueur provoquer une levée d'herbe, en particulier dans les bas-fonds (en particulier au Sud) mais il est certain que l'ensemble des ligneux sont en activité photosynthétique mais que les herbacées n'ont pas démarré. Cette prise de vue est donc idéale pour analyser le thème des ligneux sans être gêné par de la végétation herbacée active (sauf en bas-fond).

En conclusion, le suivi pluviométrique permet de faire un tri entre images et suggère de procéder à une partition Nord/Sud de la scène SPOT. On traitera séparément une "fenêtre Nord" (Nord de Banh) et une fenêtre Sud (région de BIDI).

3.2 Résultats du suivi des milieux herbacés.

3.2.1. NDVI, biomasses et humidités

Le NDVI est un indice très utilisé. Il est calculé à partir de réflectances dont la valeur physique (sur un milieu homogène) est à relier d'une part à l'activité photosynthétique d'une végétation, d'autre part à l'architecture de celle-ci et à la réflectance propre du sol. Aussi relier le NDVI à des caractères de la végétation observée (très hétérogène) ne peut procéder que d'une démarche empirique.

Sur l'ensemble des données 1987 en saison humide (c'est à dire dès la croissance initiale jusqu'au palier final), nous avons trouvé, par régression multiple, une forte liaison entre NDVI CIMEL et deux variables indépendantes : l'humidité (qui caractérise l'état de verdure de la végétation) et la quantité de matière sèche au m² (tableau VI). Mais d'une part il faut différencier les bas-fonds des prairies sèches pour optimiser le coefficient de détermination r^2 (respectivement 0.58 et 0.77), d'autre part l'erreur de prédiction dépend énormément de la date (en particulier pendant la phase de fructification qui nous intéresse). De plus il est difficile de transposer une telle relation obtenue au sol à la mesure satellite, car le NDVI calculé sur un pixel SPOT prend en compte aussi l'état de recouvrement de ce type de végétation, qui est souvent "mitée" par des taches nues.

Nous retiendrons sur ce résultat que les NDVI élevés dans le domaine herbacé pendant la phase de fructification peuvent être soit des peuplements denses en fin de végétation soit des peuplements encore très verts. Il faudrait une vue à l'époque du "plateau" de NDVI (30/8-15/9), pendant une phase humide, pour avoir une chance de déterminer réellement des gammes de biomasses, mais rappelons que la faible amplitude des NDVI max et la faible résolution radiométrique SPOT jointe aux "effets de sol" compliqueraient fortement une telle démarche. En outre, celles-ci ne seraient que des biomasses intermédiaires et non les biomasses au standing-crop.

3.2.2 Discrimination des types de végétation herbacée.

La figure 7 synthétise les résultats obtenus sur le critère "écart normalisé des canaux 2 (bande rouge) et 3 (bande proche infrarouge)" qui est considéré comme un bon indice de végétation active (ou NDVI).

- Début de saison humide

Tableau VI : Modèle de régression multiple appliqué au NDVI CIMEL (mesures à 3 m, milieux herbacés non cultivés d'humidité supérieure à 5 %, période août-novembre 1987).

Prairies sèches	$NDVI = 0.0041 H + 0.018 MS + 0.14$	$r^2 = 0.77$
Prairies humides	$NDVI = 0.0039 H + 0.016 MS + 0.22$	$r^2 = 0.58$

H = humidité de la végétation en %

MS = quantité de matière sèche (en t.ha₋₁).

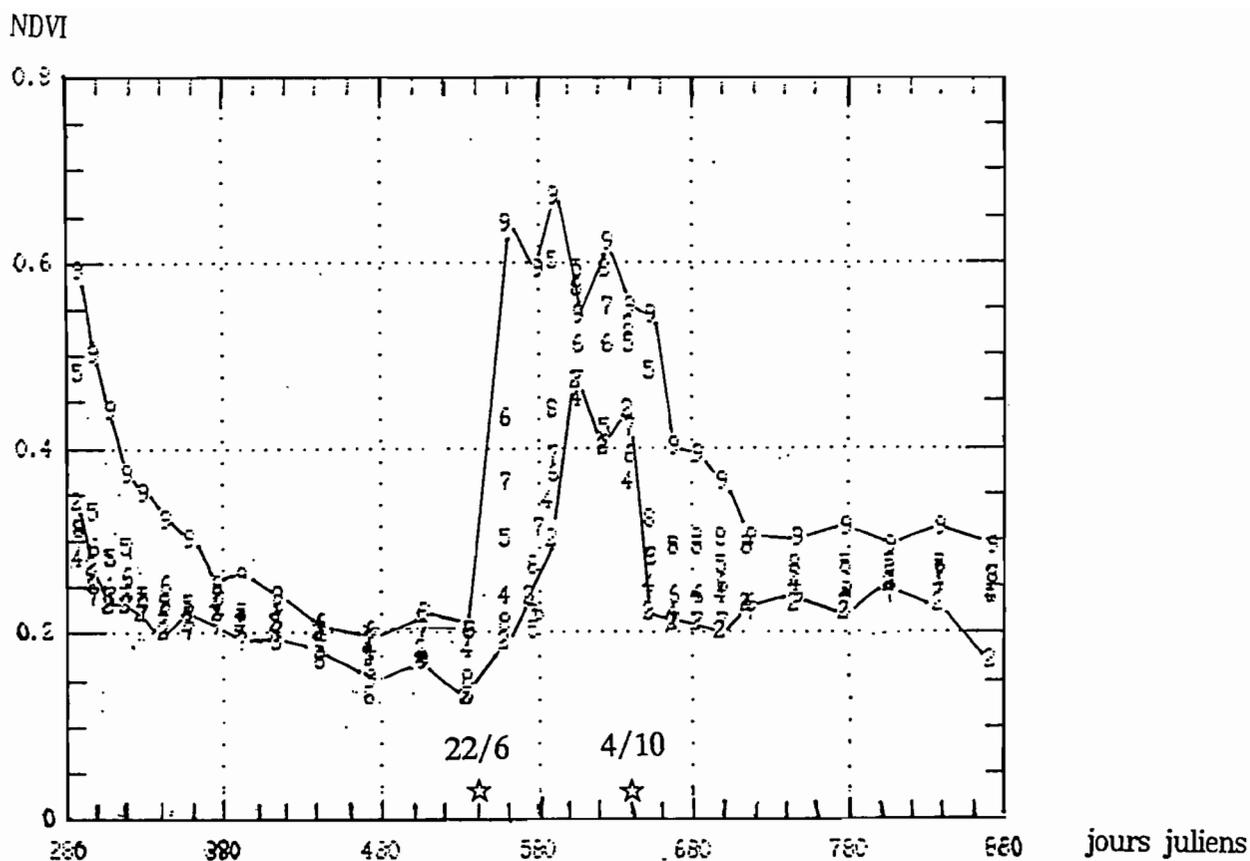


Figure 7 : Evolution des NDVI CIMEL des sites-test H_i (surfaces herbeuses).

Chiffres : numéros des sites-test.

☆ : dates de prise de vue SPOT.

Courbes : maximum (site H9) et minimum (site H2)

15. Oct 1986	287
25. Oct 1986	297
4. Nov 1986	307
14. Nov 1986	317
24. Nov 1986	327
9. Déc 1986	342
24. Déc 1986	357
12. Jan 1987	376
27. Jan 1987	391
19. Fév 1987	414
19. Mars 1987	442
18. Avr 1987	472
21. Mai 1987	505
19. Juin 1987	534
13. Juil 1987	558
3. Août 1987	579
14. Août 1987	590
30. Août 1987	606
18. Sep 1987	625
2. Oct 1987	639
16. Oct 1987	653
31. Oct 1987	668
15. Nov 1987	683
1. Déc 1987	699
19. Déc 1987	717
18. Jan 1988	747
18. Fév 1988	778
17. Mars 1988	806
19. Avr 1988	839
22. Mai 1988	872

correspondance jours juliens / dates

La figure 7 montre clairement que la deuxième partie de la saison sèche (février-fin juin) correspond en 1987 à une relative stabilité du NDVI (environ 0.15 à 0.2). Le 19 juin 1987, aucun des milieux suivis ne présente d'accroissement de NDVI, ce qui est normal puisque l'échantillon suivi ne comprend pas de site de bas-fond concerné par une crue venant du Sud. La croissance du NDVI le 13/7 est brutale. On atteint ainsi en 20 jours dans le site de bas-fond 9 peu pâturé, le NDVI maximum de 0.7, avec un couvert haut de 10 cm seulement ; dans d'autres sites (2,4,8) la progression est imperceptible (sols encroûtés ou érodés). Le site de bas-fond 5 progresse relativement peu, car il est concerné par un intense pâturage à cette époque. Quant aux sites 6 et 7 (NDVI 0.35 à 0.45), ce sont des prairies de "Bowés" à la fois soumises à un enrichissement en eau (impluvium) et à un pâturage modéré. Seules les quelques pluies de fin juin ont permis cette installation précoce dans les milieux ni encroûtés ni surpâturés.

Après la longue sécheresse de juillet, le NDVI des sites 5, 6 et 7 redescend fin juillet. Seul le site 9 (bas-fond) se maintient à son niveau atteint précédemment, sa biomasse poursuivant sa croissance.

Les fortes pluies de fin juillet sont suivies d'une nouvelle phase sèche qui nuit au progrès des sites 2, 4, 6, 7 (hors bas-fond). Observés le 14 août, leur NDVI reste entre 0.3 et 0.4. Seul le site 8, mieux alimenté en eau (pluie du 9 août) progresse. Les sites de Bas-fond, à plus de 0.6, ignorent cette phase sèche.

- Fin de la saison humide 87

Il faut donc attendre le 30 août pour que l'ensemble des stations dépasse le NDVI de 0.45. Les sites 2,4,6 et 7 restent à 0.45-0.5 ; les sites de bas-fonds sont répartis entre 0.55 et 0.6. Le 18 septembre, les mêmes valeurs se maintiennent. Par contre le 2 octobre, les valeurs ont toutes commencé à chuter, en particulier sur les sites 7 et 6 qui sont des prairies denses qui atteignent leur phase de fructification. Mais tous les sites sont à plus de 0.3. On peut faire deux groupes distincts :

- les sites 9, 8 et 5 (0.5 à 0.55) qui sont des zones de bas-fond plus argileuses et enrichies en eau de ruissellement ou ayant reçu beaucoup de pluie en septembre (5).
- Les zones 2,4,6 et 7 (0.35 à 0.45) qui portent une végétation herbacée peu abondante et sur un milieu à bilan hydrique déficitaire en septembre.

Il faut attendre le 16 octobre pour que la radiométrie différencie clairement les prairies de bas-fond (NDVI à plus de 0.5) et les prairies "sèches" qui parviennent à leur plancher de stabilité (0.2 à 0.3), comme au début de la saison sèche précédente. Ce plancher est

atteint pour le site 5 le 30 octobre et pour le site 9 , moins pâturée, le 20 décembre. On retrouve le même classement, 0.3 pour le site 9 et 0.2 pour les sites encroûtés 2,4 et 8.

- Début de la saison humide 1988.

Les mesures radiométriques ont cessé en mai 88 mais le suivi phénologique des herbacées du 5/7/88 (tableau III) montre que les herbacées sont au stade plantule sur tous les milieux. Ceci ne peut modifier significativement le NDVI "sol nu" sauf dans les milieux où les peuplements de plantules sont denses, tels les bas-fonds.

- Conclusion

Le profil d'évolution du NDVI des milieux herbacés est généralement marqué d'une phase de croissance rapide, d'un plateau plus ou moins fluctuant et d'une chute rapide. La durée du plateau est d'autant plus longue que le milieu est enrichi en eau, argileux et peu pâturé. Si l'on considère les deux dates de prise de vue retenues (4/10/87 et 5/7/88) et que l'on admet que l'on puisse transposer les observations au sol aux mesures SPOT, tout au moins dans le classement des NDVI, on peut en déduire que :

- la deuxième date fera ressortir uniquement la végétation ligneuse (sauf les bas-fonds du Sud).

- la deuxième date permettra de séparer l'ensemble de la végétation du sol nu. Il sera normalement possible de proposer deux classes de végétation herbacée : verte (prairies de bas-fonds, cuvettes et sols argileux, cultures à cycle long et à forte biomasse) et en voie de dessiccation (prairies sèches, cultures à faible recouvrement). Néanmoins une part de cette dernière classe sera dans certains cas difficile à repérer compte tenu de la faiblesse de l'indice de végétation au stade fructification et de l'hétérogénéité du bilan hydrique à toutes les échelles.

3.2.3 Cultures.

Le problème des cultures est qu'il est difficile de les traiter par le radiomètre Cimel à 3 m compte tenu du faisceau étroit de celui-ci (12° d'ouverture), de la hauteur des céréales, en particulier en octobre et du faible taux de recouvrement. Nous pouvons considérer a priori que l'évolution du comportement radiométrique des cultures n'est pas très différent du comportement radiométrique de surfaces en herbe. Le suivi de cultures de Mil réalisé par BEGUE (1991) au Niger à 6 m de distance suggère en effet

que le profil de NDVI du Mil suit, grosso modo, le profil d'une prairie en milieu intermédiaire (ni trop sec, ni trop humide).

3.2.4 Sols nus.

L'étude radiométrique au sol a mis en évidence une variabilité de la radiométrie des sols nus, affectant d'une part la brillance $[(XS2^2XS3^2)^{0.5}]$ qui dépend principalement de la granulométrie selon COURAULT et al (1990) et PUECH et CARETTE (1989). Nous observons aussi des variations de NDVI (figure 8) : les NDVI les plus faibles (0.02 à 0.08) s'observent pour des terrains, encroûtés (croûtes d'érosion) et durcis (que l'on appelle généralement *zipele*), qui ne portent jamais de végétation, quelle que soit l'abondance des pluies ; chez ceux-ci, les plus faibles valeurs sont enregistrées pour des surfaces de type érosion en brousse tigrée, présentant une surface très réfléchissante (arènes limoneuses).

Les sols voisins de ces zones dégradées, donc de même origine, une fois dépouillés de leur litière et de leur végétation en fin de saison sèche, donnent un NDVI de 0.13 à 0.2. On peut donc considérer (ici empiriquement) que le NDVI peut permettre une discrimination des sols nus, complémentaire à l'utilisation classique de la brillance : les plus forts NDVI présagent des états de surfaces propices à une faible végétation, les plus faibles indiquent des sols très érodés et très encroûtés, impropres à toute végétation. BEGUE (1991) observe que souvent les sols clairs ont un NDVI plus élevé que les sols foncés. Elle montre aussi que ce paramètre ne dépend pas de la direction d'éclairement, donc pas de la pente du terrain non plus. Aussi peut-on considérer qu'au sein d'une même classe de brillance, le NDVI renseignera indirectement sur l'existence d'une végétation clairsemée ("steppique"), même dans le domaine des faibles valeurs de cet indice.

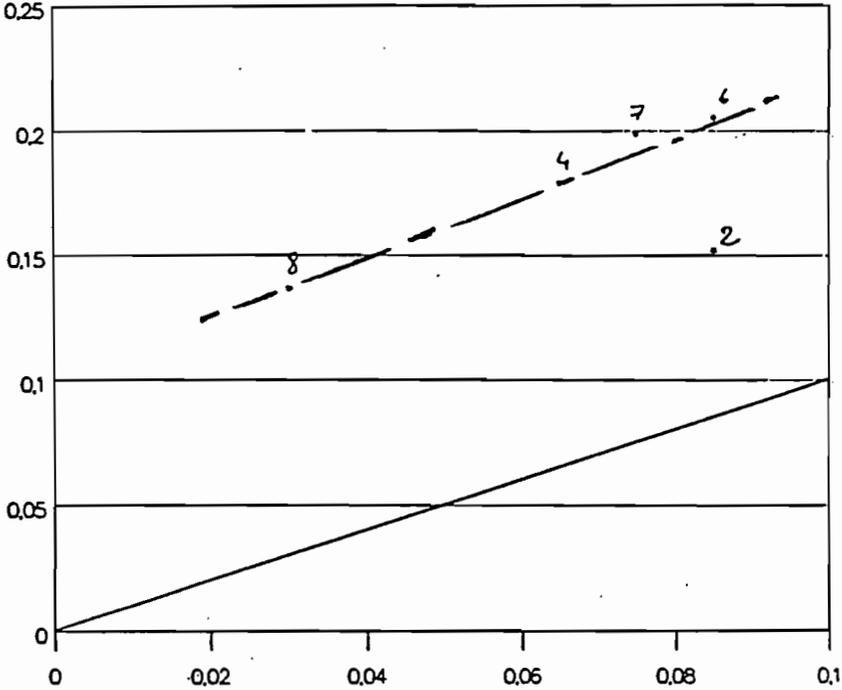
3.2.5 Stratégie de différenciation des végétations.

Le 4 octobre, une vue SPOT permettra sans doute de mettre en évidence des milieux végétaux très contrastés en traitant le NDVI. Si on arrive à masquer les pixels à dominance de ligneux (obtenus par traitement NDVI de l'image de juin), on devrait pouvoir différencier 4 autres types de milieux :

- des zones à dominance de végétation herbacée verte et dense (végétation herbacée de bas-fonds, cuvettes, sorgho et mil à forts recouvrements ou à longs cycles), 2 à 4 t MS.ha⁻¹.

Figure 8 : Comparaison du NDVI CIMEL d'un sol nu encroûté permanent et d'un sol dénudé en fin de saison sèche, sur chaque site-test (mesure du 20/6/87).

NDVI sols dénudés



NDVI sols nus encroûtés

- des zones de végétation herbacée en voie de sénescence, ou composées de végétation herbacée dense et de sol nu, ou de champs de mil à maturation et peu développés : environ 0.5 à 2 t MS. ha⁻¹.
- des zones à végétation herbacée très éparse ou à dominante de sol nus (sols nus d'origine récente), steppes, champs d'arachide, champs individuels...) inférieurs à 0.5 t MS. ha⁻¹.
- des zones dénudés totalement, très érodées et très encroûtées (dégradations d'origine ancienne).
- l'eau.

L'état différent de la phénologie des herbacées suivant les différents terroirs entraîne des erreurs potentielles de cartographie, si l'on choisit ce schéma d'analyse. Aussi cela conforte la proposition de procéder à deux analyses différentes au Nord et au Sud.

3.3 Suivi de la végétation ligneuse.

Les dates de prises de vue sont choisies à la période où théoriquement la phénophase feuillée a débuté alors que la strate herbacée ne s'est pas encore installée. Au vu des résultats présentés ci-dessus, nous constatons que la première date (22/6/87) n'est pas intéressante car de nombreux binômes espèces-sites possèdent peu voire aucune feuilles vertes (37 sur 96 observés à cette date). Le 5/7/88 par contre, tous les binômes espèces-site sont au stade feuilles adultes. L'image SPOT du 7 juillet 1988 est donc retenue pour caractériser la strate ligneuse. Nous utiliserons néanmoins l'image précédente pour tester la méthode de seuillage.

Le détail du calcul du recouvrement actif est donné aux tableaux VII et VIII pour les quatre dates qui nous intéressent plus particulièrement. Les évolutions temporelles des recouvrements actifs selon le site et pendant les 2 années de suivi sont représentées à la figure 9. Nous rendons compte ainsi de manière synthétique de l'évolution saisonnière du recouvrement foliaire à l'échelle d'une formation végétale, laquelle est due au concours de multiples variables de terrain, de composition floristique, et de climat local. Les profils montrent qu'il n'y a pas de variations interannuelles sur le niveau du plateau atteint, qui est un caractère propre du faciès. Mais le niveau minimum et la dynamique de cet indice en saison sèche est particulièrement variable. Ainsi tous les faciès sont passés du niveau de base au niveau maximum entre le 6/5/88 et le 28/5/88 alors qu'en 1987 et en 1989, seuls quelques sites (4, 6) atteignaient à une date bien ultérieure (fin juin) un niveau similaire. Rappelons que 1988 se distingue par la chute d'une pluie de 40 mm le 24 avril, alors qu'en 87, la première série de pluies significatives attend début juin

pour le Sud et mi juin pour le Nord, de même qu'en 89 (fin juin) . Fin juin 1987 et 1989, quelques sites (2,3 et 4) sont encore à leur niveau de saison sèche ce qui témoigne de la forte réaction de ces milieux à l'arrivée des pluies. Ce sont des brousses sèches, milieux caractérisés par l'absence de réserves d'eau.

Le site 1 n'a pas tout à fait cette caractéristique : bien qu'il se distingue par sa localisation excentrée,(extrême Sud) qui lui a fait bénéficier en 87 de pluies plus précoces (voir plus haut), cet avantage ne s'est pas renouvelé en 89 et pourtant la précocité relative de son recouvrement est évidente. Il faut donc admettre qu'elle est systématique sur ce site, comme dans les bas-fonds. Elle pourrait être due à une réserve en eau plus accessible (soit du sol soit des racines), permettant d'assurer précocement le déploiement des feuilles . Ce site n'est néanmoins pas représentatif de la brousse tigrée, dont les bandes boisées n'excèdent pas 30 m de large en général.

En fin de saison, la plupart des faciès de brousse sèche (2,3 et 4) ont des dynamiques de défoliation similaires . Elles débutent vers le 15/11, s'achèvent vers le 15/2. Cette dynamique est plus précoce chez le site 4 , plus tardive chez le site 1, et très tardive chez les sites de bas-fond 5,6,7 et 8. Là encore, le site 1 aurait donc un comportement très différent de ceux des autres brousses sèches. Il pourrait être lié à la particularité de son régime hydrique plus qu'à son spectre floristique. Le sol y a une capacité en eau très importante et est entièrement accessible aux racines de ligneux. Les fourrés profitent des ruissellements produits par des espaces nus et encroûté, ce qui accroît l'offre en eau en particulier en fin de cycle. Le site 1 profite particulièrement de ce mécanisme.

Il n'y a pas de variations annuelles très marquées sur la dynamique de fin de saison.

3.4 Conclusion

Cette étude au sol de sites de végétation et de la pluviométrie était nécessaire pour vérifier l'homogénéité de la région sur le plan de l'état phénologique des ligneux aux dates prises en compte. Ainsi nous avons vérifié que la date du 22/6/87 correspondait à un état hétérogène. La date du 5/7/88 convient en revanche très bien, grâce à l'occurrence de la pluie du 26/4/88 qui a permis de déclencher précocement la feuillaison des espèces les plus tardives sur les sites les plus secs, sans pour cela induire une levée durable des herbacées. Cette pluie précoce est tombée sur une grande partie de la région ce qui nous donne quelques garanties sur les zones non contrôlées par l'enquête phénologique. Obtenir une telle image est donc une véritable aubaine car nous

Tableau VII : Correspondance utilisée entre la cotation d'abondance-dominance AD et la valeur médiane de recouvrement spécifique VME (en % du taux de recouvrement total).

AD	-----	VME %
+	-----	0.25
1	-----	1.75
2	-----	4
3	-----	20
4	-----	50
5	-----	87.5

spp	AD	VME	IRH	Etat de verdeur (EV)				Indice de recouvrement p.a.(IVE)				Date	
				1987	1987	1988	1988	1987	1987	1988	1988	Feuillaison	
				22	22	23	12	22	22	23	12	1987	1988
				juin	juil	juin	juil	juin	juil	juin	juil		
SITE 3 (RSL=0.7)													
51	1	1.75	1	0	10	10	10	0.0	1.4	1.4	1.4	22/07	28/05
48	1	1.75	1	1	10	10	10	0.1	1.4	1.4	1.4	22/07	28/05
43	3	20	0.4	0	0	10	10	0.0	0.0	6.6	6.6	09/08	23/06
40	1	1.75	1.3	0	10	10	10	0.0	1.9	1.9	1.9	22/07	28/05
34	4	50	0.9	1	10	10	10	3.7	37.3	37.3	37.3	22/07	28/05
32	2	4	0.9	0	10	10	10	0.0	3.0	3.0	3.0	22/07	28/05
28	1	1.75	0.3	0	10	10	10	0.0	0.4	0.4	0.4	22/07	28/05
15	1	1.75	0.5	0	10	10	10	0.0	0.7	0.7	0.7	22/07	28/05
12	1	1.75	0.7	0	9	8	10	0.0	0.9	0.8	1.0	09/08	12/07
totaux		84.5						3.9	47.1	53.6	53.8		
SITE 2 (RSL=0.35)													
53	1	1.75	0.5	0	10	4	10	0.0	1.6	0.7	1.6	22/07	12/07
51	1	1.75	1	0	10	10	10	0.0	3.3	3.3	3.3	22/07	28/05
48	+	0.25	1	4	10	10	10	0.2	0.5	0.5	0.5	22/07	28/05
47	+	0.25	0.9	2	10	10	10	0.1	0.4	0.4	0.4	09/08	28/05
32	1	1.75	0.9	2	10	10	10	0.7	2.9	2.9	2.9	09/08	23/06
28	1	1.75	0.3	0	10	10	10	0.0	1.0	1.0	1.0	22/07	23/06
25	1	1.75	0.6	2	10	10	10	0.5	1.9	2.0	2.0	06/11	31/10
23	1	1.75	1	2	10	10	10	0.8	3.3	3.3	3.3	22/07	28/05
22	1	1.75	1	9	10	10	10	2.9	3.3	3.3	3.3	22/07	23/04
21	+	0.25	0.3	10	10	10	10	0.1	0.1	0.1	0.1	22/06	06/05
19	1	1.75	0.2	1	10	10	10	0.1	0.7	0.7	0.7	22/07	28/05
17	+	0.25	0.4	2	10	10	10	0.0	0.2	0.2	0.2	09/08	23/04
16	1	1.75	0.6	0	10	10	10	0.0	2.0	2.0	2.0	22/07	28/05
12	1	1.75	0.7	0	9	10	10	0.0	2.1	2.3	2.3	09/08	28/05
7	+	0.25	0.6	0	10	10	10	0.0	0.3	0.3	0.3	22/07	28/05
totaux		18.8						5.4	23.4	22.7	23.7		
SITE 1 (RSL=0.7)													
46	1	1.8	1.0	10	10	10	10	2.1	2.1	2.1	2.1	22/06	28/05
43	2	4.0	0.4	8	10	10	10	1.6	2.0	2.0	2.0	22/07	28/05
34	3	20.0	0.9	9	10	10	10	19.8	22.0	22.0	22.0	22/07	28/05
32	2	4.0	0.9	8	10	10	10	3.6	4.4	4.4	4.4	22/07	23/06
28	1	1.8	0.3	0	10	10	10	0.0	0.6	0.6	0.6	22/07	28/05
25	+	0.3	0.6	10	10	10	10	0.2	0.2	0.2	0.2	21/11	31/10
24	1	1.8	0.9	7	10	10	10	1.3	1.9	1.9	1.9	22/07	28/05
23	1	1.8	1.0	9	10	10	10	1.9	2.1	2.1	2.1	22/07	28/05
16	+	0.3	0.6	9	10	10	10	0.2	0.2	0.2	0.2	22/07	23/06
15	1	1.8	0.5	9	10	10	10	1.0	1.1	1.1	1.1	22/07	28/05
6	3	20.0	1.0	10	10	10	10	24.5	24.5	24.5	24.5	22/06	28/05
totaux		57.3						56.1	61.1	61.1	61.1		

spp : espèces observées sur le site

AD : cotation d'abondance-dominance

VME : valeur médiane de recouvrement en pourcentage du recouvrement total

IRH : indice du recouvrement photosynthétiquement actif du houppier

Feuillaison : date à laquelle tous les individus de l'espèce sont en feuillaison

Les totaux des IVE par date représente l'IRVL

Tableau VIII : calcul du taux de recouvrement actif des ligneux (IRVL) sur les sites L_i.

spp	AD	VME	IRH	Etat de verdeur (EV)				Indice de recouvrement p.a.(IVE)				Date	
				1987	1987	1988	1988	1987	1987	1988	1988	Feuillaison	
				22	22	23	12	22	22	23	12	1987	1988
				juin	juil	juin	juil	juin	juil	juin	juil		
SITE 6 (RSL=0.5)													
50	1	1.75	1.3	7	10	10	10	2.1	3	3	3	22/07	28/05
48	2	4	1	10	10	10	10	5.3	5.3	5.3	5.3	22/06	28/05
47	+	0.25	0.9	0	10	10	10	0.0	0.3	0.3	0.3	22/07	28/05
46	1	1.75	1	5	10	10	10	1.2	2.3	2.3	2.3	22/07	28/05
41	+	0.25	0.3	0	10	10	10	0.0	0.1	0.1	0.1	22/07	28/05
37	1	1.75	1	10	10	10	10	2.3	2.3	2.3	2.3	22/06	06/05
34	1	1.75	0.9	0	10	10	10	0.0	2.1	2.1	2.1	22/07	28/05
31	+	0.25	0.6	3	10	10	10	0.1	0.2	0.2	0.2	22/07	28/05
29	1	1.75	0.7	8	10	10	10	1.3	1.6	1.6	1.6	22/07	06/05
27	+	0.25	1	1	10	10	10	0.0	0.3	0.3	0.3	22/07	28/05
22	1	1.75	1	5	10	10	10	1.2	2.3	2.3	2.3	22/07	23/04
19	1	1.75	0.2	0	10	10	10	0.0	0.5	0.5	0.5	22/07	28/05
17	+	0.25	0.4	10	10	10	10	0.1	0.1	0.1	0.1	22/06	23/04
7	+	0.25	0.6	8	10	8	10	0.2	0.2	0.2	0.2	22/07	12/07
6	3	20	1	10	10	10	10	26.5	26.5	26.5	26.5	22/06	28/05
totaux		37.8						40.2	47.2	47.1	47.2		
SITE 5 (RSL=0.5)													
46	1	1.75	1	0	10	10	10	0.0	1.1	1.1	1.1	22/07	23/06
37	4	25.1	1	10	10	10	10	15.3	15.3	15.3	15.3	22/06	06/05
34	4	25.1	0.9	0	10	10	10	0.0	13.8	13.8	13.8	22/07	23/06
29	1	1	0.7	10	10	10	10	0.4	0.4	0.4	0.4	22/06	23/06
21	1	1	0.3	10	10	10	10	0.2	0.2	0.2	0.2	22/06	23/04
17	1	1.75	0.4	10	10	10	10	0.4	0.4	0.4	0.4	22/06	23/04
10	+	0.25	0.6	0	10	5	10	0.0	0.1	0.0	0.1	22/07	12/07
6	4	25.9	1	6	10	10	10	9.5	15.8	15.8	15.8	22/07	28/05
totaux		81.9						25.9	47.2	47.1	47.2		
SITE 4 (RSL=0.5)													
51	2	4	1	0	10	9	10	0.0	4.5	4.0	4.5	22/07	28/05
48	1	1.75	1	0	10	10	10	0.0	2.0	2.0	2.0	22/07	28/05
47	+	0.25	0.9	4	10	10	10	0.1	0.3	0.3	0.3	22/07	28/05
40	1	1.75	1.3	1	10	10	10	0.3	2.6	2.6	2.6	22/07	28/05
37	1	1.75	1	10	10	10	10	2.0	2.0	2.0	2.0	22/06	06/05
34	2	4	0.9	0	10	10	10	0.0	4.0	4.0	4.0	22/07	28/05
32	3	20	0.9	0	10	10	10	0.0	20.2	20.2	20.2	22/07	23/06
30	1	1.75	1	10	10	10	10	2.0	2.0	2.0	2.0	22/06	28/05
29	1	1.75	0.7	10	10	10	10	1.4	1.4	1.4	1.4	22/06	28/05
25	+	0.25	0.6	10	10	10	10	0.2	0.2	0.2	0.2	21/11	31/10
23	1	1.75	1	9	10	10	10	1.8	2.0	2.0	2.0	22/07	28/05
22	1	1.75	1	10	10	10	10	2.0	2.0	2.0	2.0	22/06	06/05
21	1	1.75	0.3	10	10	10	10	0.6	0.6	0.6	0.6	22/06	06/05
16	1	1.75	0.6	10	10	10	10	1.2	1.2	1.2	1.2	22/06	28/05
15	+	0.25	0.5	10	10	10	10	0.1	0.1	0.1	0.1	22/06	28/05
totaux		44.5						11.5	44.9	44.4	44.9		

Tableau VIII : suite.

spp	AD	VME	IRH	Etat de verdeur (EV)				Indice de recouvrement p.a.(IVE)				Date	
				1987	1987	1988	1988	1987	1987	1988	1988	Feuillaison	
				22 juin	22 juil	23 juin	12 juil	22 juin	22 juil	23 juin	12 juil	1987	1988
SITE 9 (RSL=0.05)													
48	+	0.25	1	0	10	10	10	0.0	0.3	0.3	0.3	22/07	28/05
29	1	1.75	0.7	10	10	10	10	1.4	1.4	1.4	1.4	22/06	28/05
17	+	0.25	0.4	5	10	10	10	0.1	0.1	0.1	0.1	22/07	28/05
7	+	0.25	0.6	0	10	10	10	0.0	0.2	0.2	0.2	22/07	23/06
6	1	1.75	1	10	10	10	10	2.1	2.1	2.1	2.1	22/06	28/05
totaux		4.25						3.6	4.1	4.1	4.1		
SITE 8 (RSL=0.3)													
48	+	0.25	1	6	10	10	10	0.3	0.5	0.5	0.5	22/07	28/05
47	+	0.25	0.9	8	10	10	10	0.3	0.5	0.5	0.5	22/07	23/06
40	1	1.75	1.3	7	10	10	10	3.2	4.6	4.6	4.6	22/07	06/05
37	1	1.75	1	10	10	10	10	3.5	3.5	3.5	3.5	22/06	06/05
34	1	1.75	0.9	1	10	10	10	0.3	3.1	3.1	3.1	22/07	28/05
33	1	1.75	1.1	10	10	10	10	3.9	3.9	3.9	3.9	22/06	23/06
29	1	1.75	0.7	10	10	10	10	2.5	2.5	2.5	2.5	22/06	06/05
27	+	0.25	1	8	10	10	10	0.4	0.5	0.5	0.5	22/07	23/06
20	1	1.75	1.2	6	10	8	10	2.5	4.2	3.4	4.2	22/07	12/07
17	+	0.25	0.4	7	10	10	9	0.1	0.2	0.2	0.2	22/07	06/05
9	1	1.75	0.9	10	10	10	10	3.1	3.1	3.1	3.1	22/06	28/05
6	1	1.75	1	9	10	10	10	3.1	3.5	3.5	3.5	22/07	28/05
totaux		15						23.3	30.0	29.2	30.0		
SITE 7 (RSL=0.65)													
49	1	1.75	1.1	1	10	6	10	0.5	4.8	2.9	4.8	22/07	12/07
48	+	0.25	1	10	10	10	10	0.6	0.6	0.6	0.6	22/06	28/05
47	2	4	0.9	9	10	10	10	8.3	8.9	9.0	9.0	09/08	28/05
42	1	1.75	1.2	9	10	10	10	4.8	5.3	5.3	5.3	22/07	28/05
41	+	0.25	0.3	10	10	10	10	0.2	0.2	0.2	0.2	22/06	28/05
37	1	1.75	1	10	10	10	10	4.4	4.4	4.4	4.4	22/06	06/05
34	2	4	0.9	9	10	10	10	8.3	8.9	9.0	9.0	09/08	28/05
33	1	1.75	1.1	10	10	10	10	4.8	4.8	4.8	4.8	22/06	23/06
31	+	0.25	0.6	9	10	10	10	0.3	0.4	0.4	0.4	09/08	23/04
29	1	1.75	0.7	10	10	10	10	3.1	3.1	3.1	3.1	22/06	28/05
27	+	0.25	1	10	10	7	10	0.6	0.6	0.4	0.6	22/06	28/05
26	+	0.25	0.7	9	10	10	10	0.4	0.4	0.4	0.4	09/08	28/05
25	+	0.25	0.6	10	10	10	10	0.4	0.4	0.4	0.4	21/11	31/10
24	1	1.75	0.9	7	10	10	10	2.8	3.9	3.9	3.9	22/07	28/05
20	1	1.75	1.2	10	10	10	10	5.3	5.3	5.3	5.3	22/06	28/05
19	+	0.25	0.2	10	10	10	10	0.1	0.1	0.1	0.1	22/06	28/05
17	+	0.25	0.4	10	9	10	10	0.3	0.2	0.3	0.3	22/06	23/04
16	+	0.25	0.6	10	10	10	10	0.4	0.4	0.4	0.4	22/06	28/05
9	1	1.75	0.9	10	10	10	10	3.9	3.9	3.9	3.9	22/06	28/05
6	1	1.75	1	10	10	10	10	4.4	4.4	4.4	4.4	22/06	28/05
totaux		26						53.8	61.0	59.1	61.2		

Tableau VIII : suite.

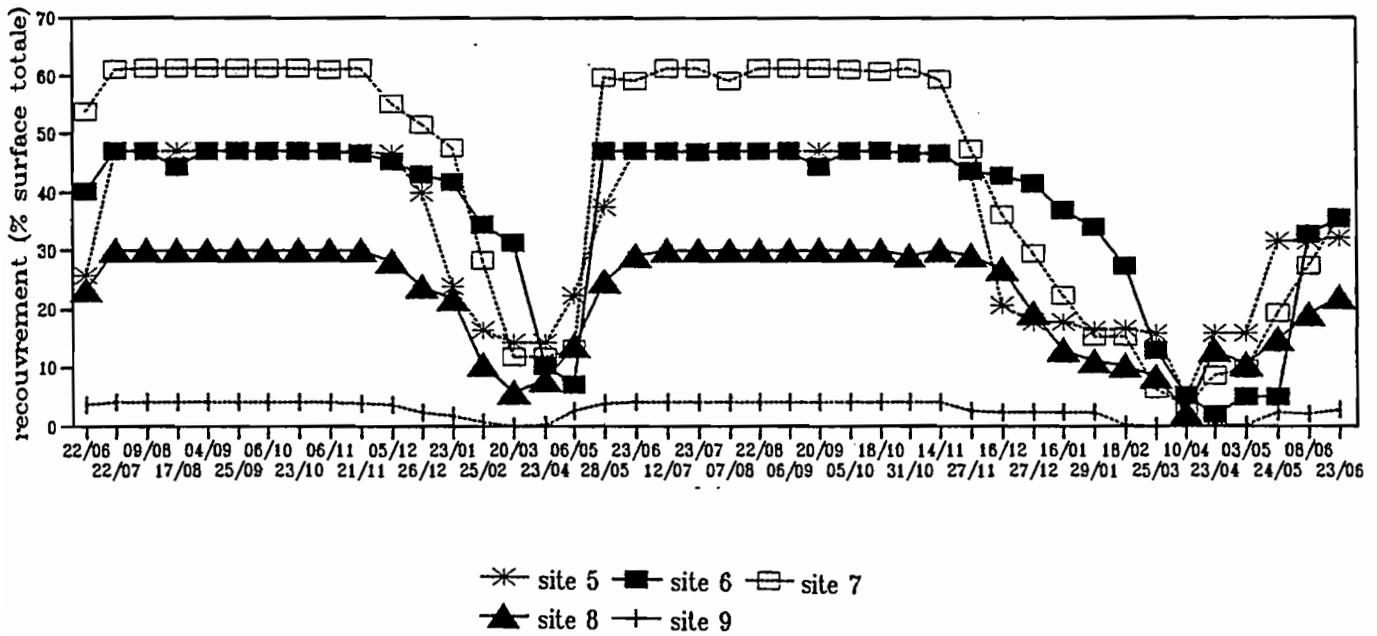
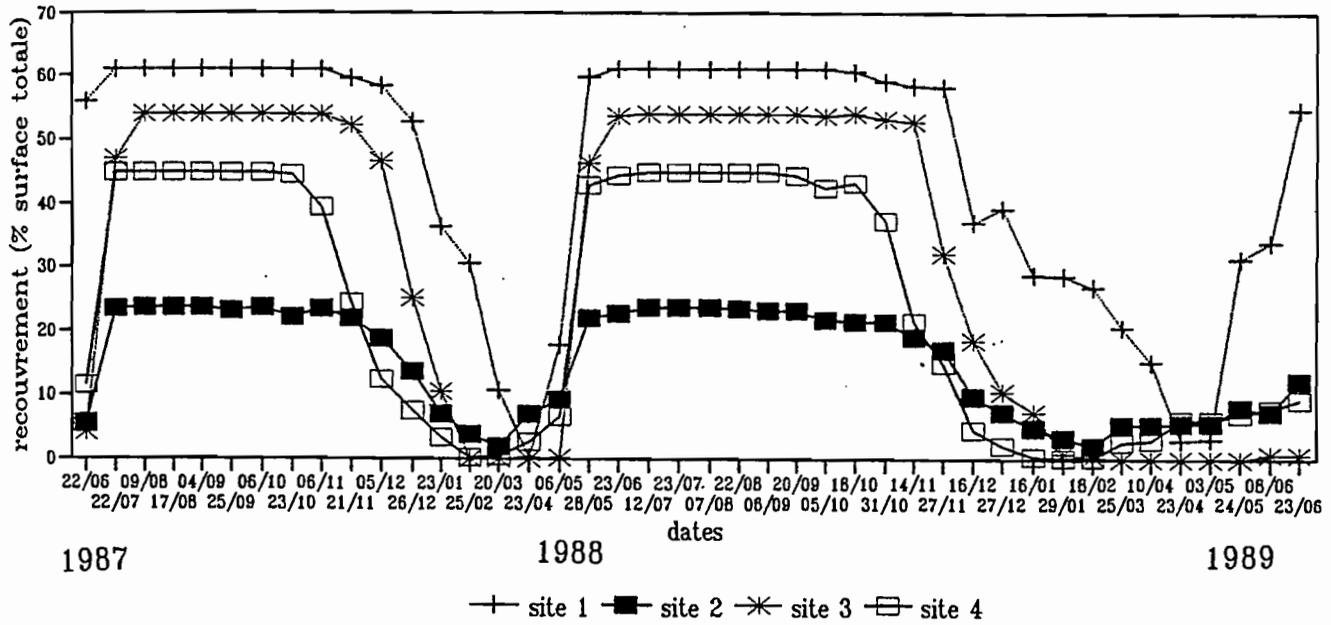


Figure 9 : Evolution du recouvrement actif des ligneux (IRVL) sur les sites L_i .

aurons à la fois la totalité des ligneux actifs et aucune herbacée (sauf dans certains bas-fonds) sur la totalité de l'image.

4. PLAN D'ANALYSE DES IMAGES

Ces données et les dates particulières disponibles permettent de proposer un plan d'analyse d'image justifié:

1) extraction d' une fenêtre couvrant la région Bidi-Banh-Kain sur les trois images. Les coordonnées sur 5/7/88 sont : lignes 500 à 2500, colonnes 500 à 2100.

2) sélection des pixels à "ligneux dominants" à partir de l'image du 5/7/88 et création d'une image binaire. Ce seuillage est couramment utilisé dans la région sahélienne. (JACQUEMINET et al, 1989).

3) Superposition géométrique de ce thème avec l'image du 4/10/87 (analyse "multidate").

4) Sur image du 4/10/87, classification supervisée des pixels non ligneux à deux critères : indice de végétation et brillance. Cette méthode a été testée avec succès par PUECH et CARETTE (1989) dans la même région.

A ce stade le produit est une carte élémentaire à haute résolution de la végétation. Chaque unité d'information est codée suivant 8 modalités : eau, sols nus, steppes, zones herbacées peu denses, zones herbacées denses, zones à dominante ligneuse. Les sols nus et steppes sont classés suivant leur granulométrie : grossière ou fine.

5) Séparation du domaine cultivé (champs et jeunes jachères) et du domaine non cultivé (parcours naturels) par interprétation visuelle et création d'un masque "terroirs cultivés". Les milieux "herbacés" sont alors classés en 4 modalités.

6) Validation de la classification supervisée et de la cartographie de la végétation à partir des transects

7) Séparation du thème "zones humides" par une méthode d'analyse morphologique des pixels connexes sur une image NDVI binarisée du 5/7/88 (MERING, 1990). Nous supposons qu'à cette date, les zones humides de plus d'un pixel sont soit enherbées (par

concentration de ruissellement) soit ligneuses. Le seuillage du NDVI opéré pour les ligneux est suffisant.

5. ANALYSE D'IMAGE ET CARTOGRAPHIE

5.1. Cartographie du thème ligneux

Compte tenu des données sol disponibles, on peut supposer faisable l'extraction des pixels à dominance de ligneux dans l'image du 5/7/88. L'indice de végétation calculée sur les canaux primaires XS2 et XS3 permet effectivement par seuillage visuel sur le logiciel PLANETES VISUTOOL de reconnaître la structure typique des brousses tigrées par exemple. Afin d'optimiser le seuillage, une première opération consiste à tester, par rapport à des % de recouvrements actifs de ligneux sur des domaines connus au sol et aux mêmes dates, le seuillage qui fournira le même % de pixels ligneux sur les mêmes domaines reconnus sur l'image.

L'histogramme du NDVI ne présente pas de seuil ou pics caractéristiques malgré le contraste attendu entre zones de végétation et zones nues. Cette continuité est due à l'existence de pixels où les ligneux ne sont pas dominants et à la faible résolution radiométrique des capteurs SPOT. Un seuillage conduira donc à une erreur à l'échelle du pixel, mais à l'échelle d'une formation végétale, cette erreur sera compensée.

Pour mieux tester la méthode d'optimisation du seuillage, nous utilisons les deux images du 22/6/87 et du 5/7/88. La première en effet montre, on l'a vu, des hétérogénéités spatiales sur le plan de la phénologie des ligneux, variabilité intéressante à exploiter. La figure 10 présente la différence de recouvrement actif de ligneux entre les deux dates pour chaque site étudié au sol (sites L_i)

Après repérage des sites-test sur les images (1 ou 2 ha soit 25 à 50 pixels), nous extrayons les données de NDVI pixel par pixel. Les histogrammes de la figure 11 présentent les données NDVI par site. Ici encore, il n'est pas évident de choisir visuellement un seuillage.

On teste sur les histogrammes différents seuillages : le taux de pixels supérieurs à chaque seuil est comparé au taux de recouvrement observé (IRVL) par une régression sur les 9 sites. On retient le seuil pour lequel le coefficient de régression est le plus

proche de 1, l'ordonnée à l'origine la plus proche de 0 et le coefficient de corrélation le plus élevé.

On obtient pour la date du 22/6/87 le seuil de 137 (en unités de codage informatique): r^2 de 0.93, $a = 1$, $b = -2\%$ (figure 12). Pour la date du 5/7/88, l'optimisation est moins bonne (r^2 de 0.75) pour le seuil de 129 (figure 12). En fait on se souvient qu'à cette date de l'herbe a commencé à pousser dans tous les bas-fonds, alors qu'en 87 seuls les bas-fonds du sud, dans lesquels nous n'avons pas de sites-test, montraient un enherbement précoce, lié à un passage de crue. La figure 13 montre que seuls les sites de bas-fond 5, 6, 7 et 8 présentent un pourcentage de pixels (classés par seuillage) excédentaire par rapport à l'IRVL. Par contre les sites "secs" sont tous bien prédits par ce seuillage, qui est donc correct. Les sites 2 et 9, concernés par un très faible taux de recouvrement, ont un taux de recouvrement sous-estimé par cette méthode. Bien que 129 soit optimal, c'est le seuil de 128 que nous retenons afin de mieux visualiser les pixels partiellement ligneux et mettre ainsi mieux en évidence certaines structures connues au sol mais mal rendues par le seuillage optimal. Dans un but de cartographie cette approximation est utile mais elle surestime la représentation des ligneux dans les milieux .

Comme de l'herbe a commencé à pousser dans tous les sites humides, on aura donc une légère surestimation du couvert ligneux en utilisant le seuillage à 129 (≥ 129), et encore plus avec le seuillage à 128. Afin de situer tous les domaines où cette surestimation aura lieu, nous proposons de cerner par analyse morphologique les régions de pixels connexes classés en "ligneux". (voir partie 6)

La différence de seuil d'une année sur l'autre n'est pas étonnante. Nous avons travaillé effectivement sur des images brutes, non corrigées des effets atmosphériques ni normalisées par rapport au calibrage des capteurs.

le résultat est une image binaire (figure 14). Codée en 0 (blanc), elle donne les ligneux et certaines zones herbeuses de bas-fond et en 1 (noir) tout le reste. On observe une grande disparité régionale :

- à l'Est et au Centre les régions granitiques à brousses peu denses (zone de Bidi) et la zone schisteuse fortement déboisée (Zone de Samni-Doré).
- à l'Ouest, une région forestière pourvue de brousses denses (plaine du Gondo) et parsemée de deltas endoréiques portant des forêts: la Zone de Mogounougoboko.

Afin d'optimiser l'analyse, nous poursuivons sur la seule fenêtre de Bidi (zones de Bidi et de Samni-Doré) pour laquelle nous avons ici toutes les données de terrain, utilisables

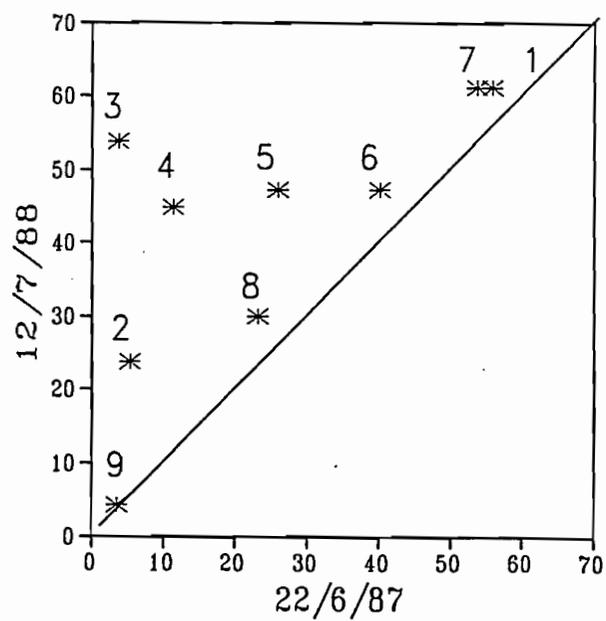


Figure 10 : Taux (en %) du recouvrement actif des ligneux. Comparaison aux dates 22/6/87 et 12/7/88 sur les sites L_i .

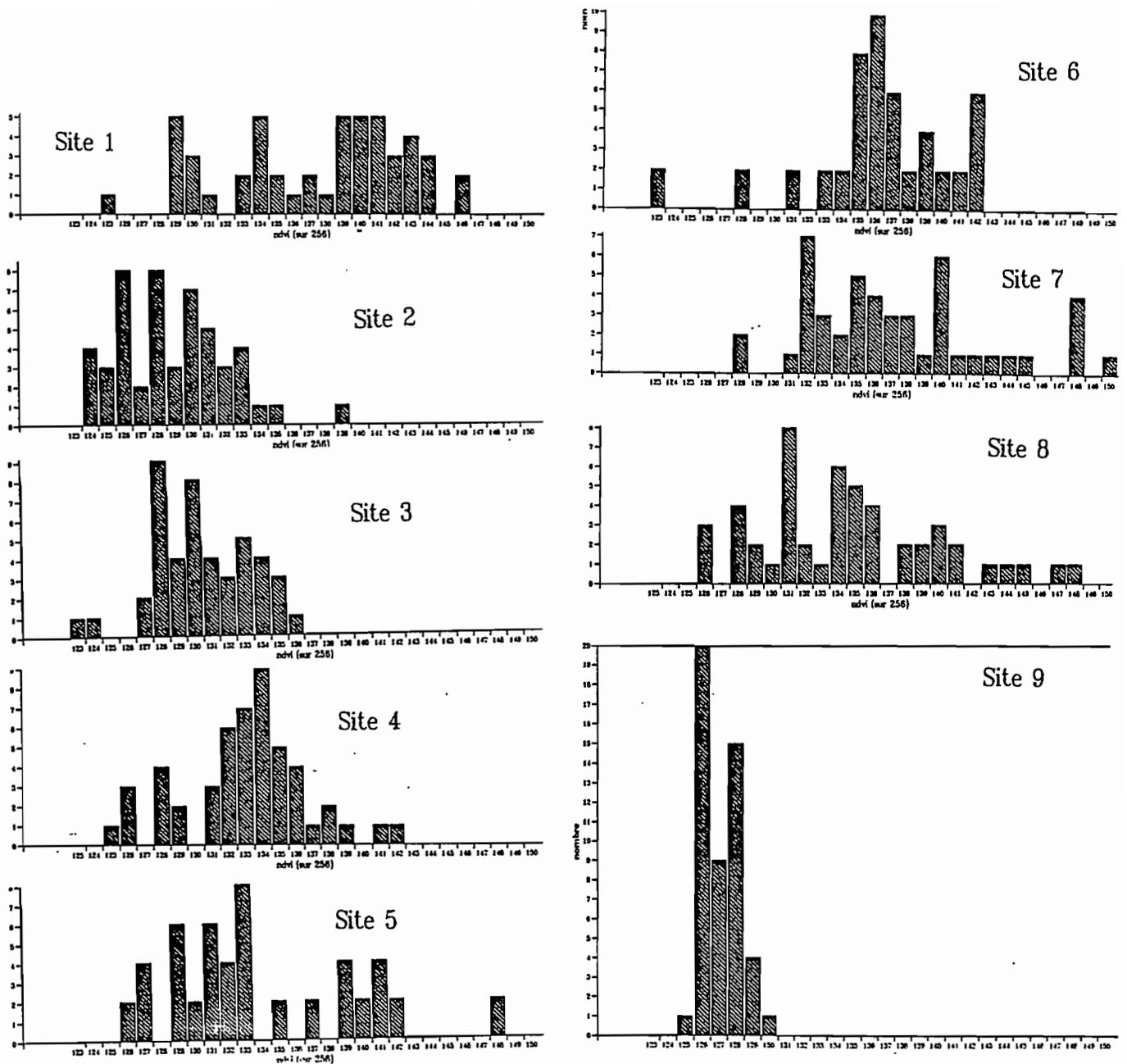


Figure 11 : Histogrammes de l'indice NDVI sur les sites L_i . Image du 22/6/87.

Figure 12 : Comparaison de l'indice de recouvrement actif des ligneux avec le taux de pixels définis par le seuil NDVI ≥ 137 sur l'image du 22/6/87.

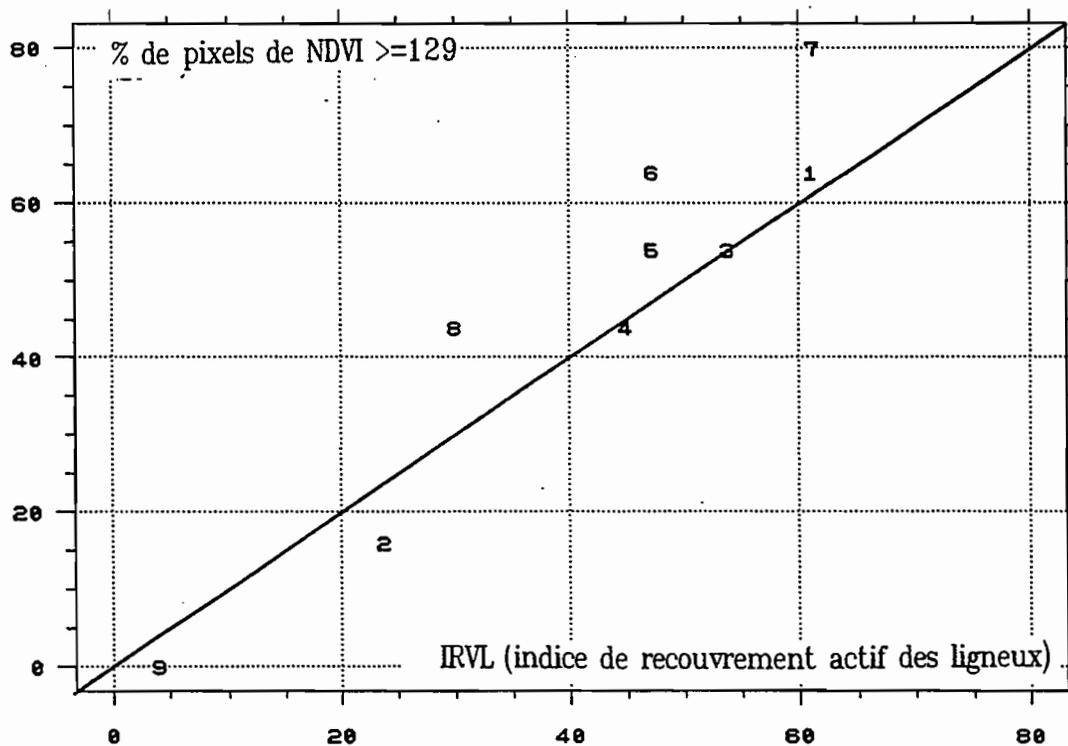
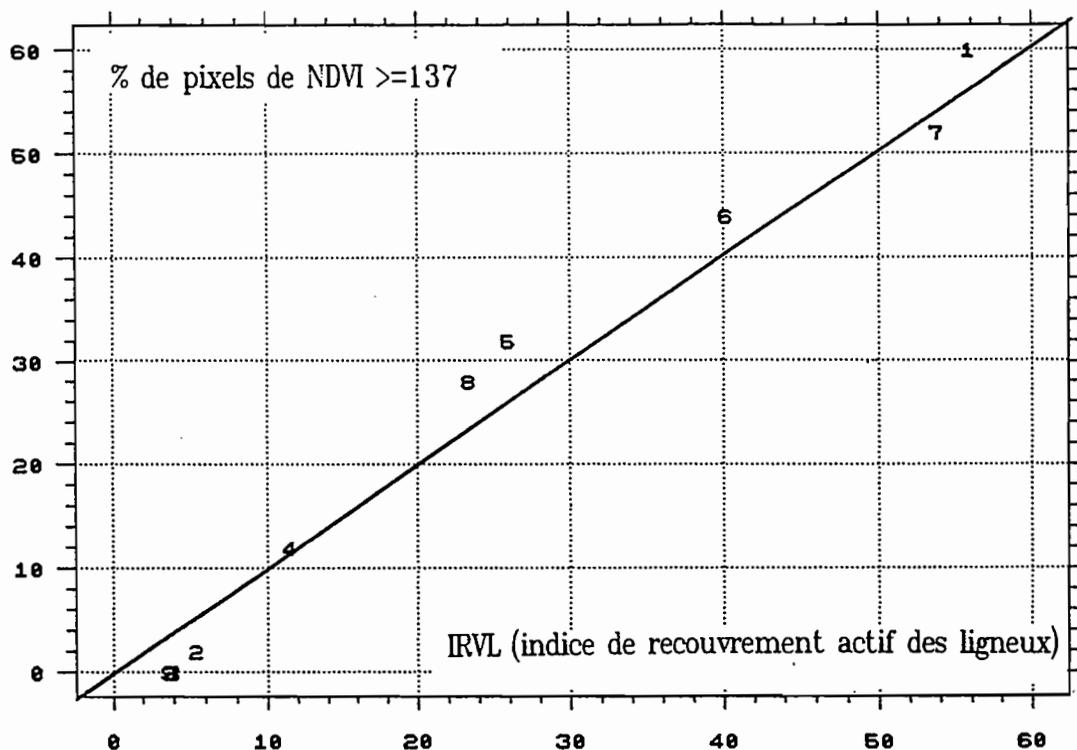


Figure 13 : Comparaison de l'indice de recouvrement actif des ligneux avec le taux de pixels définis par le seuil NDVI ≥ 129 sur l'image du 5/7/88

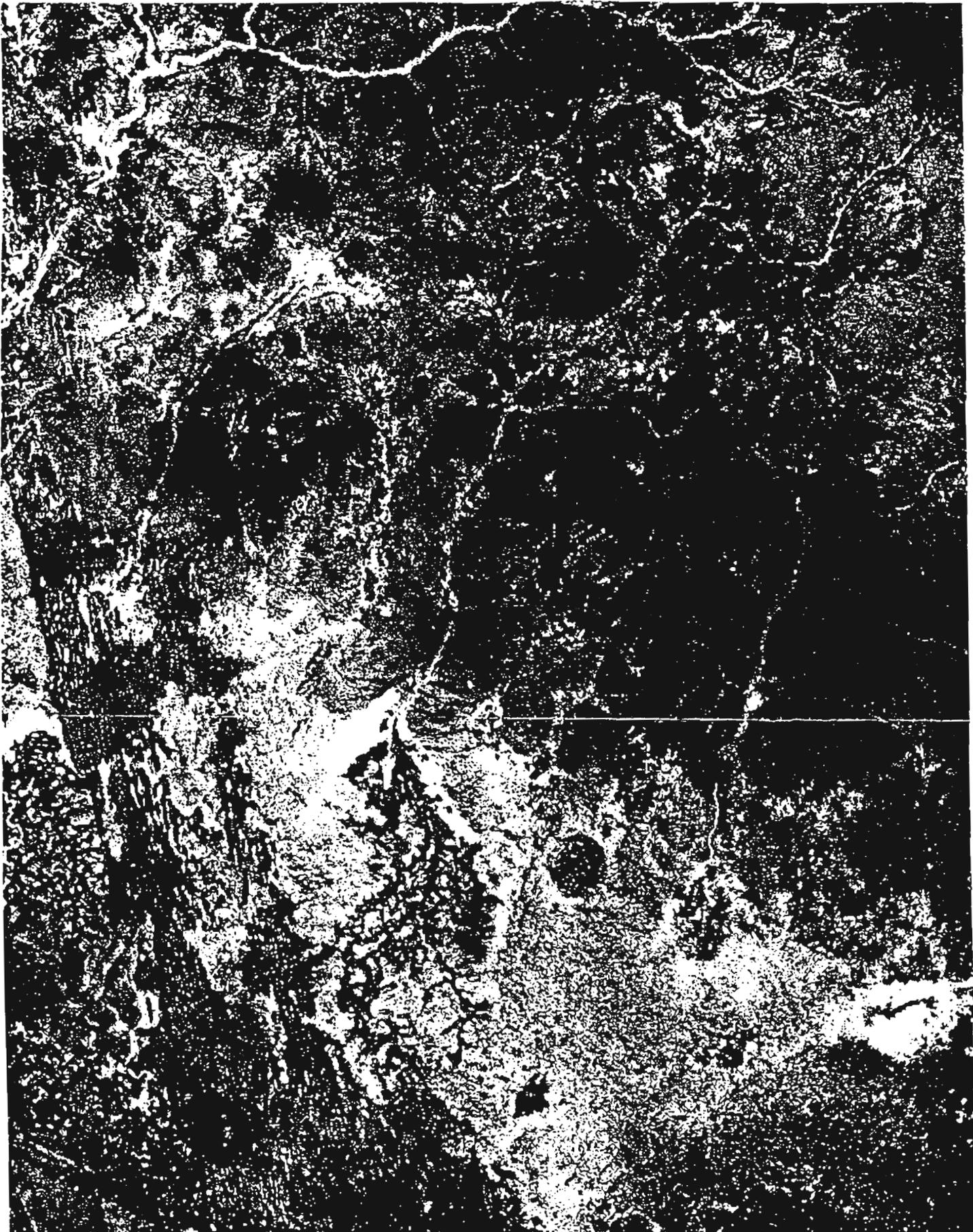
Les sites L5, L6, L7, et L8 sont des milieux humides de bas-fond.

Figure 14 : Masque des pixels ligneux.

(en blanc, classe des ligneux)

Nord ←

Echelle 1/157000



pour des milieux peu forestiers. Les fenêtres de Banh et de Mogounougoboko sont prises en charge par l'équipe ENGREF.

5.2 Superposition des deux images 5/7/88 et 4/10/87.

Le recalage utilise le programme DEGREG3 de PLANETES qui est un programme de transformation géométrique par un polynôme de degré 3. La première opération consiste en la création d'un fichier de points d'amer, pris à la fois sur les deux images. Ce travail assez laborieux est facilité d'une part, par la possibilité que donne l'environnement SUN de visualiser deux images à la fois et de modifier à volonté les seuillages, et d'autre part, le contraste élevé du NDVI en milieu soudano-sahélien : les meilleurs points d'amer sont des rebords de cuirasse, des bosquets isolés, des rétrécissements de marigots. Ce travail est en revanche gêné par les différences de végétation entre les deux dates.

Une fois qu'une série d'amers est obtenue (tableau IX), il faut éliminer les erreurs. Pour cela les couples d'amers sont visualisés sur un graphique (figure 15) et leurs coordonnées sont transformées en coordonnées polaires en prenant le premier point comme origine. Considérant que le décalage des images est régulier, la sélection des couples aberrants est ainsi très rapide. La variance obtenue après ce travail de tri est inférieure à 1 ; le nombre d'amers restants est de 25. Ils sont assez bien répartis ce qui permet d'appliquer la transformation à l'image binaire du 5/7/88. Cette image devient, après fusion, un canal de l'image du 4/10/87.

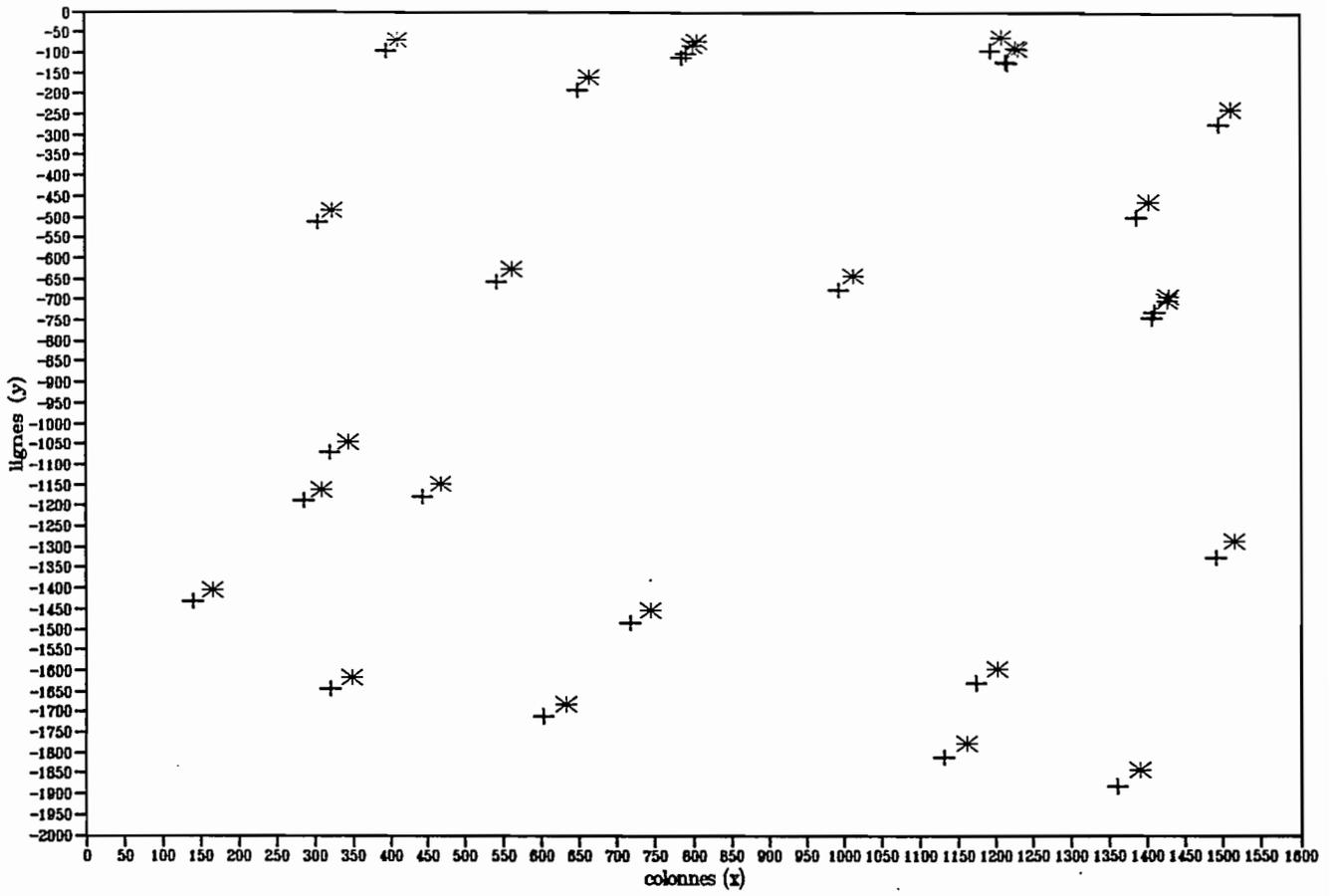
Une composition colorée sur trois canaux dont le canal "ligneux" montre que le résultat de la transformation est assez satisfaisant. Seule la bordure sud-est de l'image apparaît décalée d'un pixel ce qui gêne l'interprétation des brousses tigrées.

5.3 Classification radiométrique

Compte tenu du contraste excellent dans les canaux NDVI et "Brillance" (cette dernière est obtenue par l'opération $B = (XS_2^2 + XS_3^2)^{0.5}$, telle qu'elle est utilisée par PUECH et CARETTE, 1989), nous ne tentons pas la création d'autres néocanaux. Le NDVI reflète l'état du couvert végétal, et on sait qu'il est légèrement perturbé par la réflectance du sol. Mais comme nous n'avons ici qu'un but de cartographie de la végétation, nous ne classerons que grossièrement cet indice. L'indice de brillance reflète l'albédo, ce qui est particulièrement utile pour classer, ici encore grossièrement, les

Tableau IX : Coordonnées des points d'amer retenus.

05/07/88		04/10/87	
x colonnes	y lignes	x colonnes	y lignes
324	-485	306	-511
411	-70	397	-98
1511	-239	1494	-276
1402	-467	1385	-504
1426	-706	1406	-747
1014	-644	995	-677
468	-1148	444	-1177
344	-1045	321	-1071
167	-1406	141	-1432
916	-1392	891	-1422
1210	-64	1195	-98
562	-629	543	-658
1161	-1778	1131	-1812
665	-161	650	-191
800	-84	786	-115
806	-72	792	-103
1231	-92	1217	-126
1228	-89	1214	-124
1435	-712	1423	-745
633	-1683	604	-1713
744	-1453	717	-1484
310	-1161	287	-1189
349	-1619	320	-1646
1428	-697	1409	-734
1515	-1289	1490	-1329
1424	-1072	1399	-1110
771	-1221	743	-1256
1202	-1596	1175	-1631
1390	-1842	1361	-1881



* 5/7/88 + 4/10/87

Figure 15 : Plan des points d'amer retenus.

milieux sans végétation. Le canal XS1 apparaît assez corrélé au néocanal brillance et n'apporte donc que peu d'information.

5.3.1 Définition et analyse de zones d'entraînement

La première opération consiste à rechercher des parcelles d'entraînement.

Une fois masqués les pixels codés en "ligneux", des zones homogènes, sans ligneux et connues au sol sont extraites par le programme ZONE. Le tableau X reprend les paramètres statistiques obtenus pour chaque zone. Ces paramètres (moyenne, écart-type) sont représentés sur des graphiques à double entrée (brillance et NDVI : figures 16 et 17). La totalité de l'image donne lieu quant à elle à un histogramme bidimensionnel (figure 18).

Les parcelles d'entraînement codées en "champ de Mil" révèlent l'existence d'un gradient Nord-Sud de variation du NDVI. Au Nord, une même unité présente un NDVI plus faible qu'au Sud (figure 19) Ce fait est sans doute à relier à des états phénologiques, à des densités de plantation différentes ou à des sols différents. Nous avons vu en première partie que le climat de 1987 était sans doute le premier responsable de ce fait, car il y a eu plus de déficits hydriques au Nord (de Amené à Banh) qu'au Sud, ce qui peut avoir des incidences sur le recouvrement et la phénologie des herbacées annuelles. Ceci justifie d'avoir analysé séparément la région de Bidi et celle de Banh.

- Fortes valeurs du NDVI

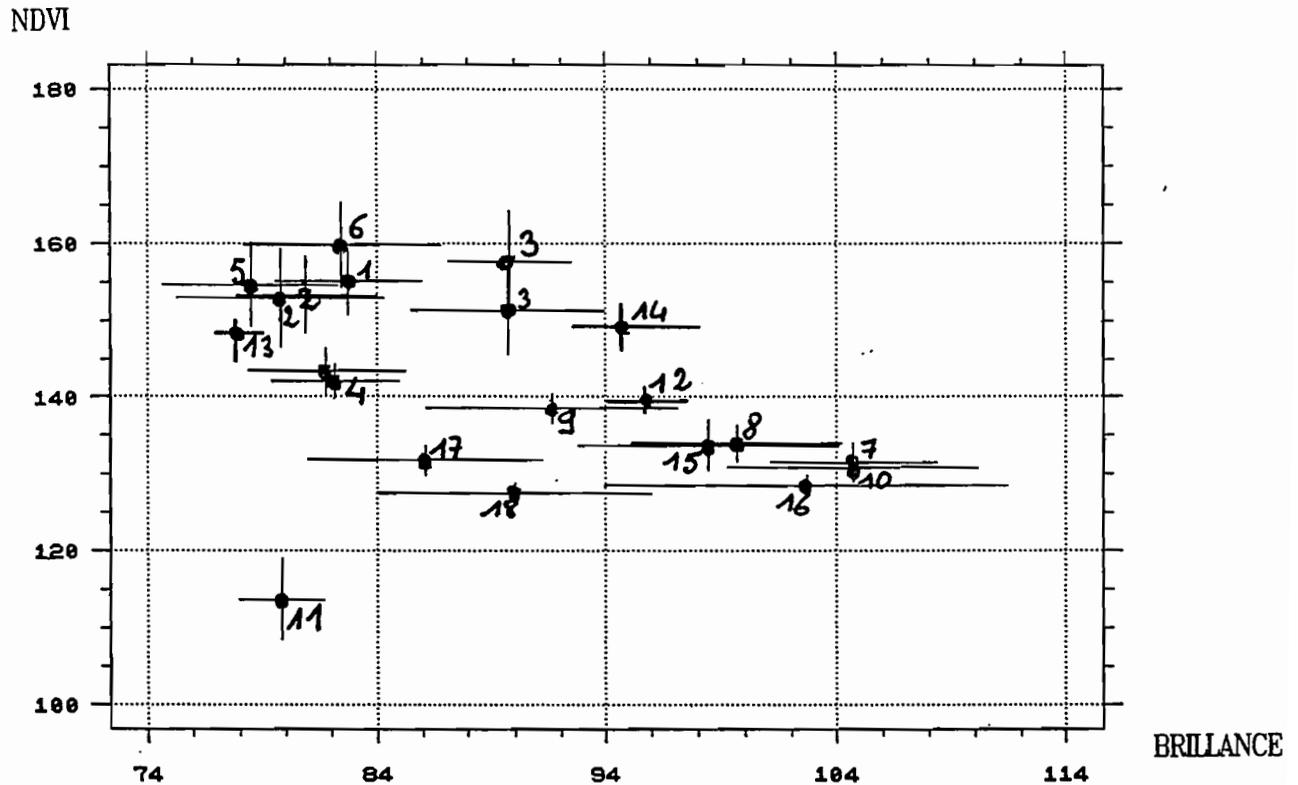
Il apparaît assez clairement que la brillance est de peu d'intérêt pour les fortes valeurs de NDVI. Les domaines de brillance d'une même zone d'entraînement sont trop étalés. Même si les prairies et les champs de sorgho sur sol argileux ont les brillances les plus faibles, il est difficile de mettre une limite entre ceux-ci et les prairies et les champs sur sables. Les fortes valeurs de NDVI ne permettent pas non plus de faire un tri entre types de cultures et entre cultures et herbacées. On peut s'attendre à ce que les zones les plus humides aient donné lieu à la fois à des fortes biomasses et à un retard de sénescence. On peut donc classer le NDVI suivant des classes de biomasse, comme il était suggéré dans le suivi radiométrique au sol. Mais on ne pourra pas faire mieux et isoler par exemple des types de végétation (tels que champs, jachères, prairies de bowés) par ce classement. On propose donc les classes d'entraînement suivantes:

Tableau X : NDVI, Brillance et XSI (moyennes et écarts-type) sur les zones d'entraînement.

ZONE numero :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16																							
Surface :	263	361	97	68	332	225	483	282	57	169	43	56	99	74	93	766																							
Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype	Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype	Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype	Canal	Min	Max	Moyenne	Ecartype																				
SPOT_XS1	67	81	72.05	2.77	SPOT_XS1	68	86	72.71	2.76	SPOT_XS1	77	87	81.47	2.32	SPOT_XS1	71	81	74.65	1.95	SPOT_XS1	66	85	71.21	3.51	SPOT_XS1	67	88	71.72	3.40	SPOT_XS1	85	105	96.63	4.07	SPOT_XS1	76	97	89.06	3.40
ndvibiban1	143	165	155.08	4.34	ndvibiban1	137	165	153.36	4.95	ndvibiban1	140	171	157.70	6.62	ndvibiban1	138	149	142.10	2.22	ndvibiban1	138	168	154.70	5.38	ndvibiban1	142	171	159.84	5.55	ndvibiban1	128	142	130.93	1.88	ndvibiban1	129	145	134.11	2.37
brille	76	92	82.73	3.18	brille	73	93	80.92	3.06	brille	85	96	89.81	2.63	brille	72	90	82.16	2.76	brille	72	91	78.48	3.79	brille	74	97	82.48	4.29	brille	92	112	104.69	5.41	brille	88	111	99.69	4.53
SPOT_XS1	73	89	81.75	4.07	SPOT_XS1	97	109	101.32	2.69	SPOT_XS1	119	137	127.53	3.67	SPOT_XS1	72	76	74.54	1.24	SPOT_XS1	75	91	85.11	2.73	SPOT_XS1	75	91	85.11	2.73	SPOT_XS1	84	91	87.00	2.02	SPOT_XS1	78	104	91.15	5.68
ndvibiban1	133	143	138.53	1.91	ndvibiban1	127	131	128.41	0.98	ndvibiban1	76	82	79.09	1.65	ndvibiban1	143	154	148.40	2.60	ndvibiban1	140	153	147.39	2.59	ndvibiban1	140	153	147.39	2.59	ndvibiban1	131	138	134.11	1.08	ndvibiban1	124	132	128.52	1.34
brille	79	98	91.63	5.45	brille	104	112	107.30	1.73	brille	76	82	79.09	1.65	brille	76	81	79.06	1.25	brille	84	98	94.42	2.68	brille	84	98	94.42	2.68	brille	93	103	99.14	2.08	brille	81	116	102.70	8.71

Figure 16 : Diagramme NDVI x Brillance des zones d'entraînement.

Chaque zone est décrite par sa moyenne et son écart-type.



Zones d'entraînement :

- 1 : mil , sableux
- 2 : mil-sorgho, sablo-argileux
- 3 : mil, sableux, bas de pente
- 4 : jachère récente à Zornia et Guiera
- 5 : prairie dense de cuvette cuirassée
- 6 : sorgho de bas-fond
- 7 : sol nu fin croûte d'érosion (Amene)
- 8 : sol nu steppique (Nairi)
- 9 : vieilles jachères dégradées à Guiera
- 10 : sol nu fin encroûté (Karwal, Nord)
- 11 : eau de barrage
- 12 : prairie dense de Shoenfeldia sur sable (Nord)
- 13 : sorgho de gouifel (Nord)
- 14 : mil sur sable (Senedjo, Nord)
- 15 : prairie sur sable, peu dense (Nord)
- 16 : sol nu hétérogène
- 17 : sol nu gravillonnaire
- 18 : sol nu gravillonnaire

XS1

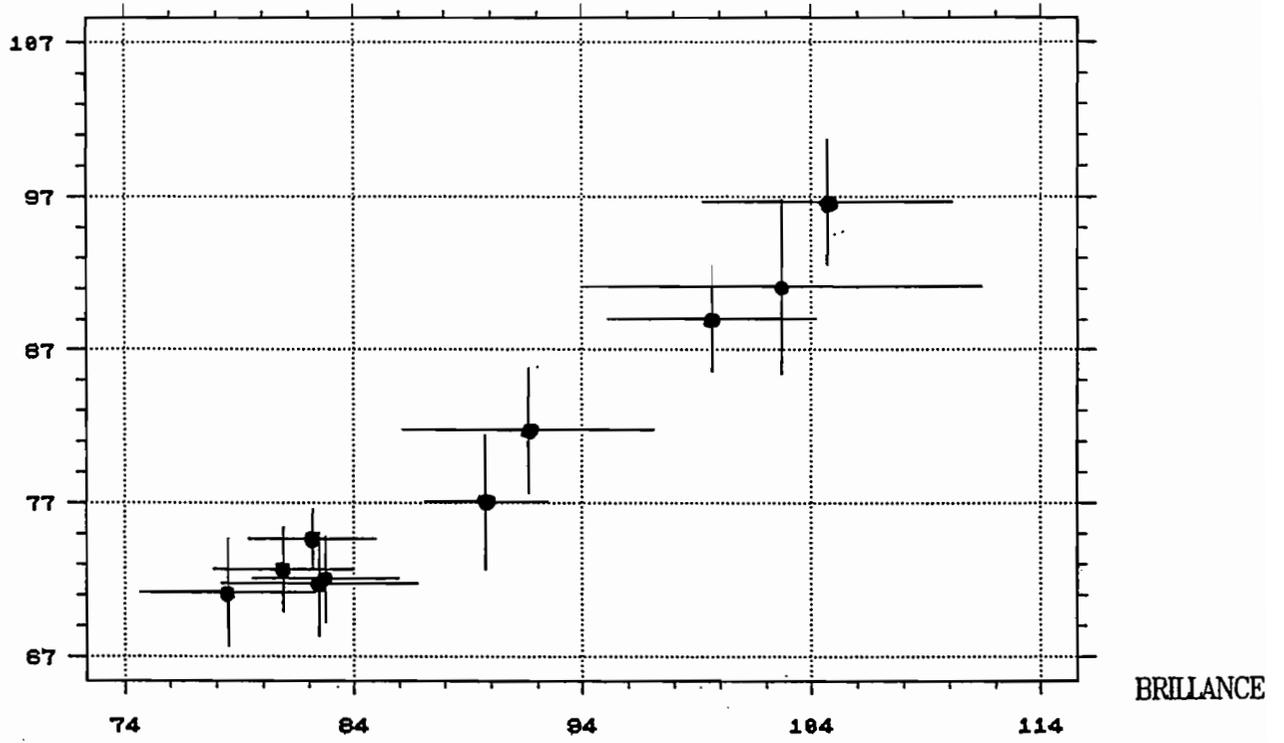


Figure 17 : Diagramme XS1 x Brillance des zones d'entraînement.

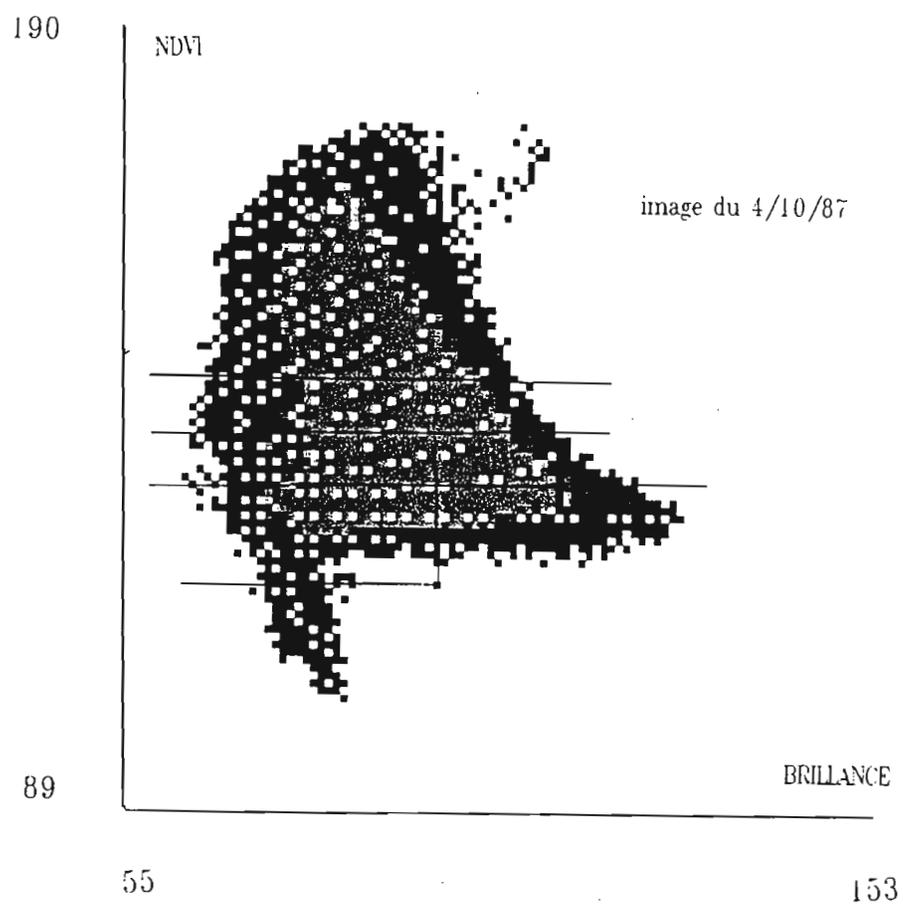


Figure 18 : Nuage de distribution NDVI x Brillance et partition pour la classification.

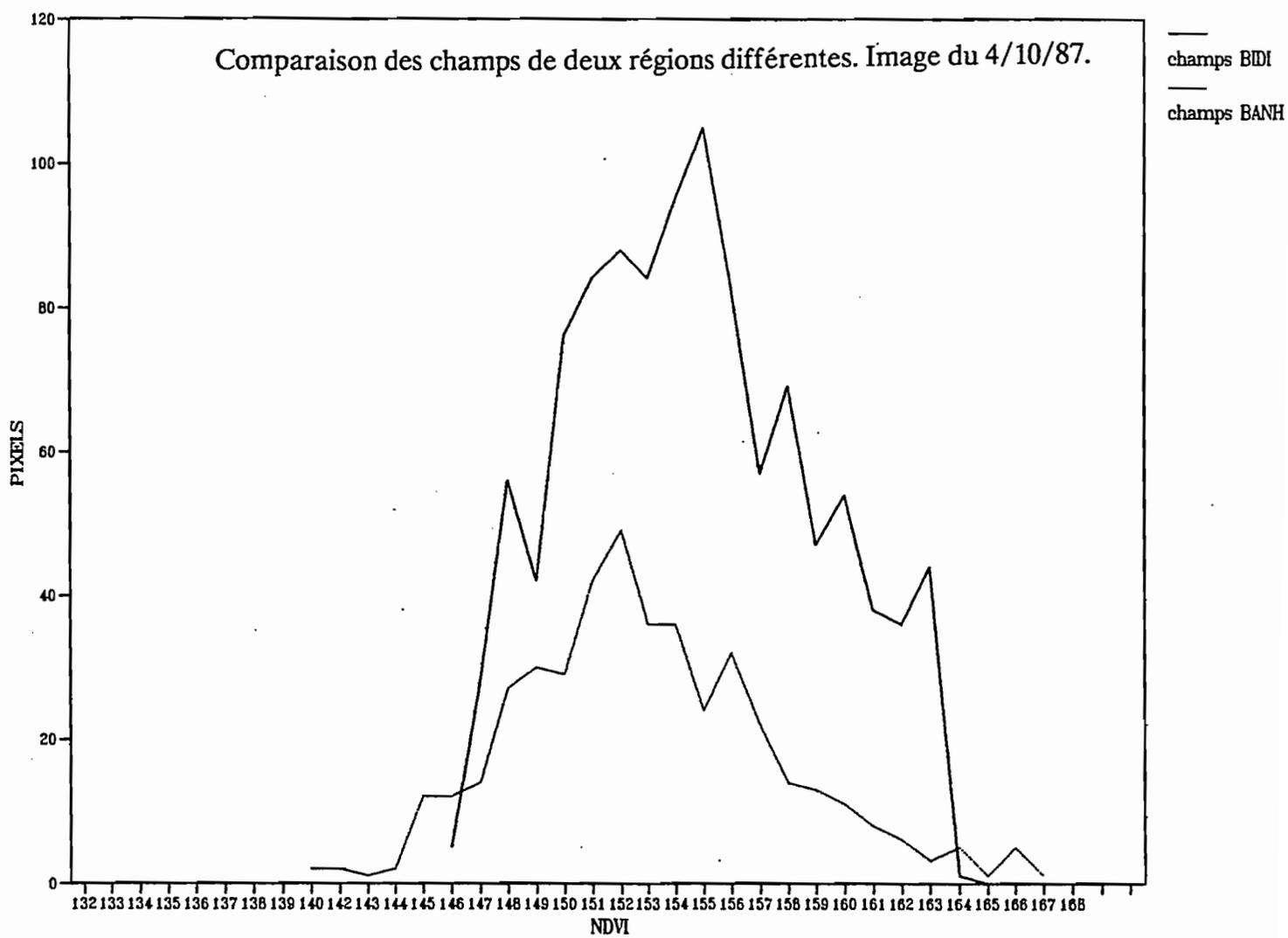


Figure 19 : Effectifs des pixels par valeur de NDVI.

classe 1 : zones 1, 2, 3, 5 et 6, : végétation herbacée à couvert dense, dominante, (sorgho et prairies de bas-fond, mil ou mil-sorgho et prairies denses hors bas-fond)

classe 2 : zone 4 : prairies et cultures de faible densité, végétation herbacée dense "mitée" par des sols nus.

Les cultures du Nord (zone 13 et 14) sont intermédiaires : comme il semble qu'elles aient eu un cycle plus court ou une plus faible biomasse, leur valeur moyenne peut donc être considérée comme une bonne limite entre les classes 1 et 2.

- Faibles valeurs du NDVI

Dans les faibles valeurs de NDVI, on trouve tout d'abord des zones "mitées" par des sols nus (zones 9 et 12) que l'on peut donc rattacher pour moitié à la classe 2. Ce type de zone permet donc de mettre une limite entre les classes de végétation et les classes de sols nus et apparentés (steppes par exemple).

La classe des "sols nus" ne nous intéresse ici que par rapport aux renseignements qu'ils peuvent fournir sur la végétation qui y est présente, rare de toute façon, et qui ne contribue pas significativement au NDVI la plupart du temps. Pourtant, PUECH et CARETTE (1989) rappellent qu'au Sahel, des % de recouvrement végétaux de l'ordre de 10 % peuvent marquer suffisamment le NDVI.

On a vu dans la partie "radiométrie au sol" qu'une relation était suspectée entre le type d'état de surface et le NDVI dans le domaine des sols nus fins : l'encroûtement et l'érosion favorisant des NDVI proches de 0, en même temps qu'ils impliquent l'absence de végétation. D'autre part, la relation entre la granulométrie et la réflectance est bien connue (PUECH et CARETTE -1989- ; COURAULT et al -1990-). On pourrait donc considérer normal que dans le domaine des fortes réflectances (sols fins) les zones 8 et 15 (prairie discontinue sur dune encroûtée, et steppe à plaques herbeuses et *Balanites aegyptiaca*) se distinguent des zones 7 et 10 qui sont érodées et encroûtées sans végétation.

Les zones d'apparence gravillonnaires (16) sont souvent à cheval sur les fortes et les faibles brillances. C'est normal, car il s'agit souvent de gravillons très fins nappant de façon irrégulière un matériau sableux peu profond, par le processus d'enrichissement relatif de gravillons en surface (CASENAVE et VALENT 1989).

Les zones nues véritablement gravillonnaires ou cuirassées se retrouvent aux très basses brillances et présentent elles aussi des valeurs très faibles du NDVI (17,18). L'absence de zones d'entraînement pour les basses réflectances mais dans une gamme de NDVI intermédiaire (entre celle des sols nus et celle des herbacées) est probablement due au fait qu'il s'agit de zones de transition, éventuellement de dimension réduite. Effectivement on trouve dans cet intervalle de NDVI des habitations, des zones de transition entre des zones nues gravillonnaires et des zones gravillonnaires portant de la végétation herbacée, des entailles et des ravines des zones gravillonnaires et cuirassées, généralement faiblement végétalisées, mais aussi des végétations desséchées particulières à base de légumineuses (*Zornia glochidiata*, *Cassia tora*) sur sols sableux secs (zones encroûtées). Ces zones de transition ont généralement un caractère de steppe dégradée (arbres en mauvais état et déchaussés, plaques herbeuses discontinues). Il est probable que cette végétation rare contribue à maintenir un NDVI non nul.

Dans le domaine des faibles NDVI, on peut donc considérer que des facteurs (l'état de surface du sol pour les sols fins, l'impact d'une faible végétation pour les sols grossiers) ont une incidence sur le niveau de NDVI. En retour, le NDVI permet de séparer des terrains rigoureusement nus des terrains naturels à caractère steppique :

- présence d'épineux, plages herbeuses sur sols à surface fine
- combrétacées, *Pterocarpus lucens* dégradés, *Boscia senegalensis* sur sols à surface grossière
 - en milieu cultivé et de jachères, touffes de *Guiera senegalensis* ou *Piliostigma reticulatum*, plaques herbeuses à *Zornia glochidiata*, *Schoenfeldia gracilis* et *Eragrostis spp.*

Le problème que pose ces zones steppiques est leur grande hétérogénéité. Elle est due aux phénomènes d'érosion hydro-éolienne et d'encroûtements pour une part. D'autre part le comportement de la végétation en période de difficulté (alternance de sécheresses et, surexploitation) est soit relictuel, soit pionnier, ce qui la concentre sur en des lieux précis, favorisés. Une steppe représente donc une surface où sont juxtaposées des plaques herbeuses sur bourrelets sableux, des zones à surface gravillonnaire, des zones à surface encroûtée, des zones plus sableuses et de petits bosquets.

Ainsi les zones délimitables comme zones steppiques sont en fait des surfaces mixtes, où se juxtaposent des pixels steppiques, et des pixels d'autres classes radiométriques. Cette unité cartographique n'est donc que partiellement identifiable radiométriquement.

Dans le domaine des faibles NDVI et les basses brillances, on trouve bien sûr l'eau libre présente les mares et les retenues.

- Conclusion

L'analyse des zones d'entraînement permet de faire une partition de l'histogramme bidimensionnel NDVI - Brillance. Le seul secteur sans zone d'entraînement identifiable (steppes gravillonnaires) est reconstitué par déduction. Le caractère "en patchwork" de certaines unités permet de proposer des limites de classes fiables pour la classification de l'image.

5.3.2 Classification

Les méthodes de classification sont nombreuses. Elles consistent à segmenter les valeurs multispectrales du champ de pixels qu'est l'image en intervalles radiométriques. Les caractéristiques de chaque classe peuvent être obtenues par l'analyse statistique d'échantillons de pixels représentatifs de l'image entière. C'est la classification non supervisée, utile quand on ne connaît rien du terrain. Lorsque l'échantillon de pixels est choisi en fonction de sa représentativité d'une classe cartographique au sol (cas des zones d'apprentissage ou d'entraînement), la classification est supervisée. Dans cette dernière, la phase de classement est donc précédée d'une phase d'analyse et d'apprentissage dont la qualité influe sur le résultat de classement. La définition des intervalles est statistique (centre de gravité et variances, ellipses de confiance), ou arbitraire entre deux valeurs radiométriques. Lorsqu'on utilise plusieurs variables, comme ici (Brillance et NDVI), il peut être avantageux de procéder de manière statistique, car des relations entre variables peuvent exister. Dans ces conditions les régions radiométriques devraient être définies par des ellipses de confiance dont les axes auraient une direction particulière.

COURAULT et al (90) ont réalisé une ACP sur les trois canaux d'un échantillon de pixels (image SPOT d'une région soudano-sahélienne du Niger). Ils montrent que l'on peut remplacer les trois variables radiométriques par deux composantes décorréélées, une composante de clarté (très corrélée à XS1 et XS2, mais à laquelle XS3 contribue mal) et une composante de végétation. Ceci peut nous rassurer sur l'absence de relation entre NDVI et brillance, mais suggère qu'un meilleur calcul de brillance eut été obtenu en prenant XS1 et XS2.

D'autre part nous avons vu que de nombreuses parcelles d'entraînement sont en fait composites et l'une d'entre elles est même obtenue par déduction. Une classification à base statistique à partir des centres de gravité et des variances observées sur les zones d'entraînement produit une forte quantité de pixels non classés. Une tentative a été réalisée avec la méthode de Sebestyen mais a abouti à une confusion évidente entre différents types de végétation. Il y a contradiction entre la taille nécessairement grande des parcelles d'entraînement et la réalité hétérogène de ce milieu.

_ Classification par "hypercube"

Chaque classe radiométrique C_i est modélisée par un intervalle de valeurs $[\min_{ij}, \max_{ij}]$ dans chacun des n canaux j . Un point $x (x_1, \dots, x_n)$ appartient à C_i si pour tous les canaux j , x_j appartiennent à $[\min_{ij}, \max_{ij}]$. Travaillant sur deux canaux, chaque classe est définie par un rectangle sur l'histogramme bidimensionnel.

Les classes ont été définies à partir de l'analyse de la signification des valeurs moyennes et des variances pour chaque zone d'entraînement. Nous avons vu que la plupart des limites de classes ont été prises à partir de la moyenne de zones de transition ou des zones hétérogènes. Les autres limites ont été définies par essais successifs.

Les plages numériques des classes définitives sont les suivantes (zone de Bidi, image où les pixels ligneux sont masqués):

Tableau XI : Limites des intervalles retenus pour la classification.

Interprétation des classes radiométriques E	NDVI		BRILLANC	
vég. herbacée dense, lign. minoritaires	> = 146		1	255
vég. herbacée peu dense	140	145	1	255
steppes sur sol à surface grossière	133	139	1	96
steppes sur sols à surface grossière	133	139	97	255
sols nus à surface grossière	120	132	1	96
sols nus à surface fine	120	132	97	255
eau	1	119	1	255

Ces seuils sont légèrement différents dans les deux autres fenêtres pour tenir compte de l'état différent de la végétation.

5.3.3 Cartographie des types de végétation.

La classification proposée est une cartographie des ressources en végétation. Les autres thèmes cartographiques peuvent être classés en :

- thèmes phytosociologiques. Ils sont inaccessibles à la télédétection en l'état actuel du travail de terrain. Seules des hypothèses de correspondances peuvent être utilisées entre thèmes physiologiques et thèmes phytosociologiques.

- thèmes structuraux et physiologiques : ils sont directement accessibles par analyse visuelle de l'image classée grâce à la bonne résolution spatiale, si l'on arrive à séparer auparavant le domaine cultivé du domaine "naturel", qui ont des réponses radiométrique similaires.

Deux directions d'analyse peuvent être fournies : l'analyse de la structure et de la texture (sur image binaire ou non) ; l'analyse visuelle d'associations de pixels.

- thèmes fonctionnels : le résultat des activités agraires en terme de végétation (cultures, jachères, zones dégradées) n'est pas directement accessible, par classification radiométrique. Par contre, il est possible d'interpréter visuellement le type d'occupation du sol en utilisant les règles empiriques décrites au paragraphe 1.1.5. Effectivement, on voit sur l'image classée que les zones cultivées ou "terroirs", étendues importantes sans pixels ligneux, sont bien isolées des zones naturelles, parsemées de pixels ligneux, qui servent uniquement à des activités sylvo-pastorale. Lorsque ce n'est pas le cas (cas des champs isolés sur front de défriches), les champs se distinguent par une texture plus homogène, l'absence rigoureuse de ligneux, et des formes géométriques. Dans les cas douteux (cas des prairies de bowés, que l'on pourrait confondre avec des champs), il faut utiliser les connaissances de terrain. Le fait de pouvoir séparer le domaine cultivé du domaine non cultivé permet ici encore de faire des hypothèses sur le type de végétation qui accompagne champs et jachères :

- classe herbacée dense : sorgho et mil à haut rendement (plus de 5 qx ha⁻¹), jachères à *Piliostigma reticulatum* et à prairie diversifiée, *Andropogon gayanus* en bordure de champs, parc-verger de très faible densité (baobab, tamarinier, *Acacia albida*, *Hyphaene thebaïca*).

- classe herbacée peu dense : mil et sorgho-mil à faible rendement (1-5 qx/ha) avec *Guiera senegalensis*, *Sclerocarya birrea*, *Combretum nigricans*, jachères à *Zornia glochidiata* ou *Schoenfeldia gracilis*, *Eragrostis spp*, *Guiera senegalensis*.

- classes steppiques : jachères dégradées à *Guiera senegalensis* et plaques herbeuses, *zipele* (terrains sans strate herbeuse et à croûte d'érosion) à épineux (*Balanites aegyptiaca*, *Acacia senegal*, *Acacia seyal*, *Boscia senegalensis*).

Concrètement, un masque "terroirs" est réalisé à partir du programme ZONE. L'utilisation de ce masque en deux temps permet de décomposer la classe 1 entre "champs et jeunes jachères denses" et "prairies naturelles denses", puis la classe 2 entre "champs et jachères à faible biomasse" et "prairies naturelles à faible biomasse".

Le programme PALETTEDIT permet d'attribuer une couleur aux différentes classes obtenues. Le résultat semble satisfaisant, aux erreurs de tracé des terroirs près. Néanmoins cette classification n'est qu'un modèle qu'il faut valider. C'est le rôle des transects au sol.

6. VALIDATION DU MODELE DE CLASSIFICATION

La validation de cette classification est faite par quatre approches successives :

- 1) matrice de confusion classique utilisant les zones d'entraînement : on compare leur nature (connue au sol) avec celle prédites par le modèle de classification. C'est une fausse validation, ces parcelles ayant servi à caler le modèle ;
- 2) comparaison avec les mesures sur transects au sol aux dates de prise de vue, ces mesures n'ayant pas servi à l'élaboration du modèle ;
- 3) relations entre radiométrie et recouvrement de la strate herbacée ;
- 4) comparaison avec des cartographies au sol ayant une résolution similaire.

6.1 Matrice de confusion sur zones d'entraînement

C'est une mise en tableau des taux de pixels répartis en classes, d'une part par la connaissance de terrain (définition des zones d'entraînement), d'autre part d'après le processus de classification. L'optimum de qualité de classification est obtenu quand 100% des pixels d'une zone d'entraînement sur l'image sont classés radiométriquement dans la classe correspondante "de terrain".

La matrice de confusion réalisée à partir des zones d'entraînement (Tableau XII) présente un degré de précision acceptable, les taux de bon classement dépassant la plupart du temps 70%. Des problèmes de discrimination s'observent néanmoins pour les

Tableau XII : Tableau de confusion : taux de pixels dans chaque classe.

zones de contrôle assemblées par thème	N° thème	taux de pixels classés dans les thèmes n°									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ligneux	1	82		18							
cultures et jachères denses	2		94.9		5.1						
prairie à forte biomasse	3	13.2		86.8							
cultures et jachères peu d.	4		32		60.8		7.2				
prairies à faible biomasse	5					65.6	34.4				
steppes gravillonnaires	6					10	60			30	
steppes sur sols fins	7					20		70	10		
sol nu fin	8							30.7	68.6	0.7	
sol nu gravillonnaire	9								16.6	83.4	
eau	10									1.7	98.3

classes "steppes", "végétations claires", mais aussi "sols nus fins". La raison de cette incertitude tient, selon nous, à deux facteurs :

1) Le seuillage de NDVI utilisé pour différencier des types de milieux à végétation active peu abondante, clairsemée (type steppes et végétation à faible recouvrement) est à sa limite de pertinence et ne peut qu'entraîner des erreurs. Celles-ci sont dues en particulier à la perturbation du NDVI par les propriétés radiométriques du sol et aussi à la mauvaise résolution radiométrique SPOT. Il existe aujourd'hui des avancées dans le domaine de la correction des NDVI (utilisation de l'indice SAVI et de l'indice de rougeur (ESCADAFAL et HUETE, 1991) qui permettront d'améliorer la correspondance NDVI-végétation pour les faibles valeurs. Le test de cette méthode pour l'analyse d'image n'est pas encore effectué.

2) Une partie de l'erreur peut provenir non pas du processus de classification mais de la définition de zones d'entraînement non homogènes. C'est particulièrement un danger en zone soudano-sahélienne où la variabilité spatiale des milieux est telle que les zones d'entraînement homogènes et d'un seul tenant sont difficiles à obtenir.

3) Une autre incertitude s'observe entre les classes "végétation à faible biomasse" du domaine naturel et "steppe gravillonnaire". La cause en est ici à la fois la mauvaise qualité du paramètre NDVI mais aussi le seuil de brillance, défini arbitrairement. Il eut été utile, mais au prix d'une complication, de ménager une classe intermédiaire de brillance qui représente les sols de granulométrie intermédiaire, et les sols fins mais foncés (à litière sombre par exemple).

6.2 Validation sur transects

Les 3 transects linéaires ont été réalisés dans des zones hétérogènes du 4 au 6 octobre 1987, à la date de prise de vue. Ils nous fournissent des segments repérables sur l'image, de longueur définie mais de largeur variable (figure 20). Chaque segment considéré comme "unité homogène" au sol est défini par des estimations visuelles de taux de recouvrement (herbacé, sol nu, ligneux, le tout faisant 100%, Tableau XIII).

Le premier travail consiste, sur un agrandissement de l'image classée, à délimiter précisément les segments (en longueur) et à isoler la "formation homogène correspondante". La largeur du segment est donc variable. Il arrive que l'axe lui-même du transect soit tangent à cette formation décrite au sol. La figure 21 illustre cette première opération.

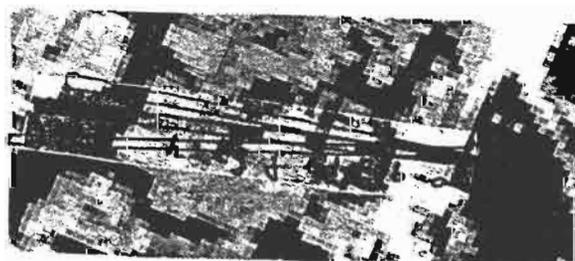
Image compo.colorée du 4/10/87

Image compo.colorée du 12/7/8

a
b
c
d
e
f
g
h
i
j
k
l
m
n
o
p
q
r
s
t
u
v
w
x
y
z



code des segments



Transect Ouest

Image du 4/10/87

a
b
c
d
e
f
g
h
i
j
k
l
m
n
o
p
q
r
s
t
u
v



Transect Sud

Transect Nord

Echelle

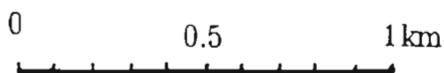


Figure 20 : Transects de validation

Tableau XIII : Résultats des observations sur transects. parcours du 5 au 6/10/87.

transect	physionomie	segment	granulométrie	% de recouvrement (total 100%)			
				herbacées	hauteur cm	ligneux	sol nu
O	zone nue	a	g			5	
O	b arbust	b	f			60	
O	b arbust	c	g			20	
O	b arbust	d	f			35	
O	b arbust	e	f			10	
O	zone nue	f	f			5	
O	b arbust d	g	f			70	
O	jachère	h	g			5	
O	b arboré	i	f			40	
O	zone nue	j	f			0	
N	b arbust	a	g	60	50	30	10
N	bosquet	b	g	20	90	15	65
N	b boisée	c	f	10	120	90	0
N	bsq clair	d	f	60	100	40	0
N	bsq dense	e	f	20	30	80	0
N	b arbu ep	f	f	45	30	10	45
N	bsq clair	g	f	40	50	60	0
N	b arbu cl	h	g	60	80	10	30
N	bosquet	i	g	60	100	40	0
N	steppe	j	g	45	60	40	15
N	bf	k	f	50	60	50	0
N	steppe	l	g	40	60	15	45
N	bf	m	f	50	60	50	0
N	steppe	n	f	40	60	15	45
N	bf	o	f	50	60	50	0
N	steppe	p	g	40	60	15	45
N	bf	q	f	50	60	50	0
N	b mouchet	r	f	30	100	25	45
N	b boisée	s	f	20	100	80	0
N	b mouchet	t	g	20	80	30	50
N	b mouchet	u	f	50	100	35	15
N	bosquet	v	f	20	90	80	0
N	steppe	w	g	20	70	10	70
N	b arbust	x	f	55	80	45	0
N	b arbust	y	f	55	80	45	0
N	z anthrop	z	g	40	80	35	15
N	z anthrop	aa	g	40	80	35	15
N	b arbu d	ab	f	10	80	90	0
N	z anthrop	ac	f	20	80	0	80
S	jachère	a	g	15	90	10	75
S	bosquet	b	f	60	100	40	0
S	sol nu bt	c	g	0	0	0	100
S	bosquet	d	f	50	100	50	0
S	zone nue	e	g	0	0	0	100
S	bosquet	f	f	70	100	30	0
S	zone nue	g	g	0	0	0	100
S	bosquet	h	f	30	70	10	60
S	steppique	i	g	10	60	15	75
S	bsq clair	j	g	50	50	40	10
S	b arborée	k	g	5	10	5	90
S	arbo, arbu	l	f	75	40	25	0
S	parc arbo	m	f	50	70	50	0
S	jachère	n	g	0	0	10	90
S	jachère	o	f	20	60	60	20
S	b arbust	p	f	40	100	50	10
S	bsq clair	q	f	55	80	30	15
S	zone nue	r	f	20	60	0	80
S	bsq clair	s	g	35	70	15	50
S	b arbust	t	g	50	70	50	0
S	mil	u	f	100	200	0	0
S	mil	v	f	90	200	10	0

Tableau XIV : Résultats de la classification : composition des segments de transect.

transect	physionomi	segment	% de pixels classés en		
			sols nus	herbacées	ligneux
O	zone nue	a	85	15	0
O	b arbust	b	13	50	38
O	b arbust	c	50	40	10
O	b arbust	d	27	73	0
O	b arbust	e	25	75	0
O	zone nue	f	79	21	0
O	b arbust d	g	0	100	0
O	jachère	h	48	52	0
O	b arbore	i	0	77	23
O	zone nue	j	100	0	0
N	b arbust	a	77	23	0
N	bosquet	b	77	23	0
N	b boisée	c	0	26	74
N	bsq clair	d	88	12	0
N	bsq dense	e	0	6	94
N	b arbu ep	f	0	50	50
N	bsq clair	g	21	52	26
N	b arbu cl	h	0	71	29
N	bosquet	i	32	34	34
N	steppe	j	40	52	8
N	bas fond	k	0	29	71
N	steppe dé	l	58	42	0
N	bas fond	m	0	69	31
N	steppe dé	n	58	42	0
N	bas fond	o	0	69	31
N	steppe dé	p	58	42	0
N	bas fond	q	0	20	80
N	b mouchet	r	70	30	0
N	b boisée	s	14	47	39
N	b mouchet	t	50	39	11
N	b mouchet	u	38	36	26
N	bosquet	v	0	6	94
N	steppe	w	34	49	17
N	b arbust	x	13	43	45
N	b arbust	y	48	44	7
N	z anthrop	z	0	35	65
N	z anthrop	aa	16	32	53
N	b arbu d	ab	0	35	65
N	z anthrop	ac	100	0	0
S	jachère	a	50	50	0
S	bosquet	b	0	58	42
S	sol nu bt	c	100	0	0
S	bosquet	d	17	33	50
S	zone nue	e	100	0	0
S	bosquet	f	0	80	20
S	zone nue	g	100	0	0
S	bosquet	h	50	0	50
S	steppique	i	92	8	0
S	bsq clair	j	85	18	18
S	b arborée	k	86	14	0
S	arbo, arbu	l	0	50	50
S	parc arbo	m	50	25	25
S	jachère	n	60	40	0
S	jachère	o	0	100	0
S	b arbust	p	0	78	22
S	bsq clair	q	14	68	18
S	zone nue	r	60	40	0
S	bsq clair	s	52	35	13
S	b arbust	t	0	10	90
S	mil	u	13	87	0
S	mil	v	0	79	21

La méthode de validation consiste à comparer les taux de pixels classés dans chaque thème avec les % de recouvrement observés (Tableau XIV).

La classification radiométrique a été simplifiée par regroupement de classes :

- "sols nus" regroupent les 4 classes de sols nus et de steppes.
- "tapis herbacé" regroupe les 4 classes de végétation herbacée.
- "ligneux" ne représente que la classe "ligneux" définie par l'image de juillet 88.

6.2.1. Validation du thème "ligneux" (figure 22).

Les plus petits segments (de moins de 4 pixels) sont éliminés, car l'erreur de localisation peut être trop importante.

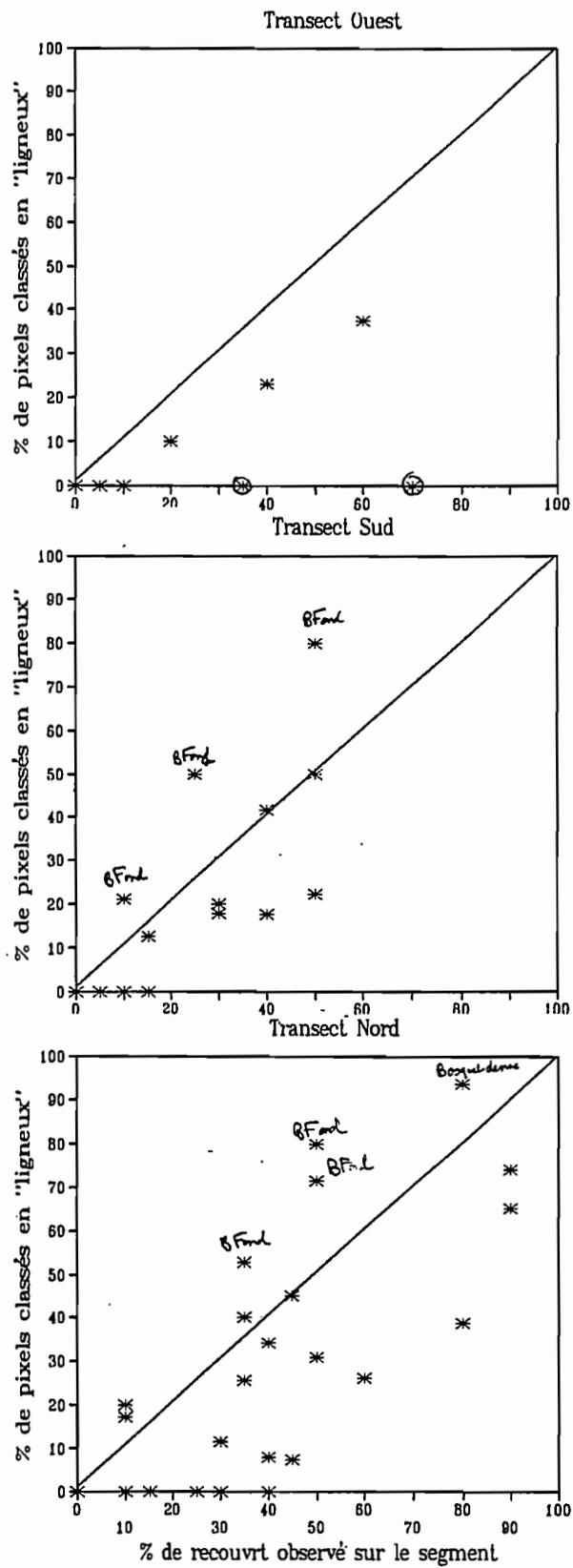
Les graphiques de comparaison (figure 22) montrent que systématiquement, la classification surestime le % de recouvrement ligneux réel des bas-fonds, ce qui était prévu (Cf chap. 5.1.), mais aussi dans quelques segments de bosquets denses.

L'imprévu provient du fait que de nombreux segments classés sous-estiment le taux de recouvrement observé au sol, dans tous les types de milieux, mais surtout dans les milieux à faible recouvrement ligneux où la classification peut ne reconnaître aucun ligneux. Pourtant, la méthode de seuillage paraissait fiable.

- En fait les sites-test ont laissé de côté toute une catégorie de milieux ligneux qui forment les segments les plus "sous-estimés" : brousses "mouchetées" à arbres et arbustes isolés, jachères à buissons de *Guiera senegalensis* ou *Piliostigma reticulatum*, dont le faible % de recouvrement actif, la faible hauteur et le mode de répartition non concentré les rend peu "visibles" par la méthode de seuillage du NDVI. C'est aussi le cas des formations d'épineux et de *Guiera senegalensis*, formations pionnières dans les conditions actuelles de dégradation des écosystèmes et donc très représentées dans tous les types de milieu. La méthode du seuillage est donc peu adaptée à l'expression de ces milieux, qui sont passés inaperçus. Ils sont par contre classés en "herbacés denses" le plus souvent.

- d'autre part la cotation de recouvrement ligneux est plus un indice d'encombrement spatial que de couverture réelle, laquelle est la base du calcul de l'IRVL qui a servi à étalonner le modèle "ligneux". Dans les formations où le taux de recouvrement est élevé, la sous-estimation tient donc au fait que la classification ne donne pas l'encombrement des ligneux mais l'IRVL, nécessairement plus faible. D'autre part il est notoire que les estimations de taux de recouvrement au sol surévaluent systématiquement les éléments les moins nombreux.

Figure 22 : Graphes de validation du thème "ligneux".



Si l'on tient compte de ces remarques, on peut considérer valide la cartographie sous réserve de considérer :

- le % de recouvrement des bas-fonds et des bosquets denses surestimé de 30 %.
- que les pixels ligneux ne prennent en compte que les ligneux en formations concentrées, excluant épineux et formations arbustives basses.
- que les % d'encombrement sont systématiquement sous-estimés.

6.2.2. Validation du thème "herbacées".

On exclut le segment Ouest de l'analyse (pas de parcours en octobre). On exclut aussi les segments dont le % de recouvrement ligneux est surestimé ou sous-estimé de plus de 10 points de recouvrement, ceci entraînant automatiquement l'erreur sur les autres formations .

La figure 23 donne le graphique de comparaison. Le % de recouvrement est particulièrement bien prédit par le modèle de classification, dans les deux transects. Sont néanmoins surestimés les recouvrements de certaines jachères (les repousses arbustives nombreuses marquent le NDVI comme des "herbacées peu denses") et les zones de brousse tigrée, où le mauvais calage géométrique du masque ligneux par rapport à l'image d'octobre provoque l'apparition de "fantômes" classés "herbacés denses", réduisant de ce fait le nombre de pixels classés en sols nus.

6.2.3. Validation du thème "densité du couvert herbacé"

Deux classes existent : "couvert dense" et "couvert peu dense" ou "mité". On calcule sur chaque segment le taux de pixels classés "herbacé, dense" par rapport au nombre de pixels classés "herbacés". On classe ainsi les segments où les pixels "herbacés denses" sont dominants. On observe que ces segments sont souvent ceux dans lesquels la hauteur des herbacées est la plus forte (tableau XV), ce qui valide le modèle.

6.2.4. Validation du thème "granulométrie des sols nus"

Pour cela, nous n'avons qu'une vague indication sur les transects : présence de gravillons ("sols grossiers") ou absence ("sols fins"). On compare sur un graphique les deux histogrammes correspondants, obtenus en calculant la fréquence de différentes classes de taux de pixels classés "sols nus grossier" (figure 24). L'histogramme des segments observés comme "fins" sont ce que l'on pouvait prévoir. Hors transect, on trouve des surfaces importantes (steppes sableuses classées en "steppes gravillonnaires") mal

observations au sol					classification image	
transect	physionomie	segment	% de recouvrem des herbacées	hauteur cm	dominance de pixels "herbacés dens	% de pixels herbacés"
N	bosquet	b	20	90		23
N	b boisée	c	10	120	d	26
N	b arbu ep	f	45	30	d	50
N	b arbu cl	h	60	60	d	76
N	b mouchet	u	50	100	d	36
N	bosquet	v	20	90		6
N	steppe	w	20	70		49
N	b arbust	x	55	80		43
N	z anthrop	z	40	80		35
N	z anthrop	ac	20	80		0
S	jachère	a	15	90		50
S	bosquet	b	60	100	d	58
S	sol nu bt	c	0	0		0
S	bosquet	d	50	100	d	33
S	bosquet	f	70	100	d	80
S	steppique	i	10	60		8
S	b arborée	k	5	10		14
S	jachère	n	0	0		40
S	bsq clair	q	55	80	d	68
S	zone nue	r	20	60		40
S	bsq clair	s	35	70		35
S	b arbust	t	50	70		50
S	mil	u	100	200	d	87
S	mil	v	90	200	d	79

Tableau XV : Comparaison des observations sur segments de transects et des résultats de la classification. Thème "milieux herbacés".

Figure 23 : Graphes de validation du thème "herbacées".

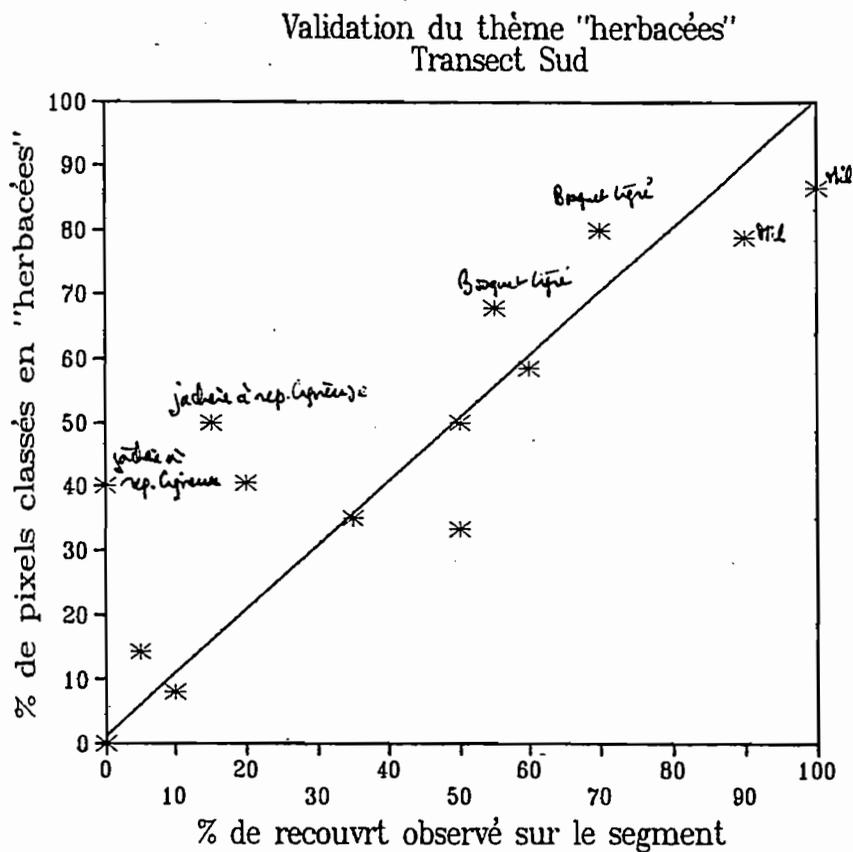
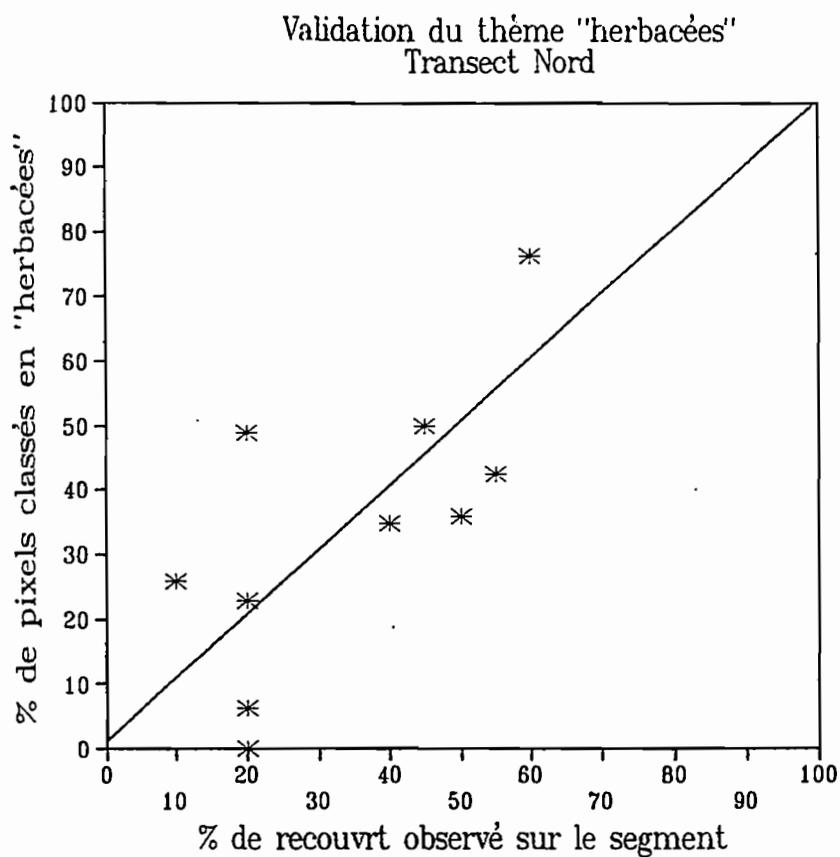
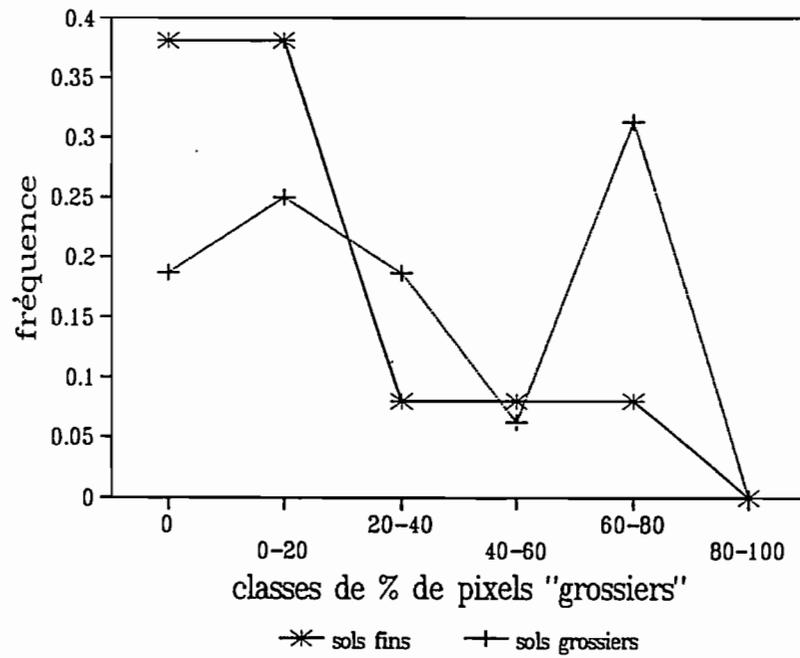


Figure 24 : Graphe de validation du thème "granulométrie de surface".



prédites. Elles correspondent à des zones "steppiques" où la brillance faible n'est pas toujours due à une granulométrie grossière mais à une litière de légumineuses desséchées. Vers le Nord-Est, il existe une vaste zone dunaire classée en "steppe gravillonnaire". Il s'agit soit d'un gravillon fin ou d'un sable grossier, mais peut-être aussi de traces de feu de l'année précédente ou encore d'une litière de légumineuses (*Cassia sp.*, *Zornia glochidiata*).

L'histogramme des "sols grossiers" est lui assez mal prédit. Beaucoup de sols nus "grossiers" sont classés "fins". Cette erreur provient plus du mode de description "existence de gravillons", particulièrement ambiguë (il peut y en avoir un peu ou beaucoup), que de la classification elle-même.

6.3 Analyse des relations entre radiométrie et strate herbacée.

6.3.1. Principe

A partir des transects de Bidi, on ne considère que les pixels classés comme non ligneux, tels que définis par le seuil NDVI sur l'image de juillet 88.

Les valeurs radiométriques des pixels présents sur les segments de transects, pour l'image d'octobre 87, sont confrontées aux recouvrements estimés de la strate herbacée.

L'objectif est de vérifier la possibilité d'estimer les taux de recouvrements herbacés à partir de variables radiométriques.

Les variables choisies, sur un segment, sont les suivantes :

- min, max, moyenne du NDVI
- min, max, moyenne de la Brillance

6.3.2. Ajustements statistiques :

Le recouvrement herbacé, estimé globalement sur un segment de transect (en % de recouvrement total), est considéré comme une variable quantitative à expliquer. Certains segments provenant de la fusion de plusieurs observations, les valeurs moyennes par segment peuvent prendre des valeurs intermédiaires.

Dans un premier temps, les 6 variables radiométriques sont prises comme variables explicatives. La plupart des variables sont fortement corrélées entre elles (tableau XVI). Les corrélations avec le recouvrement herbacé sont les plus fortes pour les différentes variables de NDVI (r variant de 0.61 à 0.73) mais peuvent être aussi significatives pour celles de brillance (r max 0.55). Un modèle de régression à 6 variables a un r de 0.77.

Une régression simple du NDVI moyen sur le % de recouvrement (figure 25) a un r de 0.73 (écart-type résiduel 18.8, significatif à 0.01). Une transformation par le carré de NDVI moyen n'améliore pas la régression.

L'analyse des résidus ne permet pas de faire un choix entre les deux (ceux ci sont corrects dans les deux cas).

Le NDVI moyen a Néanmoins été retenu comme variable explicative la plus performante.

6.3.3. Discussion

En dépit de la faiblesse des données de base (26 segments utilisables), cette analyse permet d'entrevoir de bonnes possibilités d'estimation de recouvrement herbacés à partir d'une couverture satellitaire. Cette possibilité n'est pour l'instant envisagée que pour les pixels à faible recouvrement ligneux, c'est à dire ici non classés comme ligneux par seuillage du NDVI. D'autre part il est probable que la forte résiduelle soit due en grande partie à des variables d'état de la végétation comme le suggère notre analyse de radiométrie sol, mais aussi à la sous-estimation de végétations non herbacées.

6.4. Confrontation avec des cartes de même résolution spatiale.

La cartographie de la végétation à une résolution proche de celle que nous proposons n'a été faite qu'en deux endroits, un petit terroir de brousse "Samniweogo" réalisé au sol en décembre 1987 par SERPANTIE et le terroir de village et la brousse de "GOURGA TILLI" réalisée par photo-interprétation de photographies aériennes 1984 par TEZENAS DU MONTCEL.

La confrontation des deux cartographies (figures 26 et 27) révèle peu d'erreurs de classement. Seules apparaissent erronées certaines zones classées "steppes gravillonnaires" alors qu'il s'agit de prairies sénescentes à très faible densité, recouvertes par endroits d'une litière de légumineuses desséchées, sur sol sableux érodé et encroûté (croûte d'érosion, figure 26).

Les sols nus étendus provenant d'une dégradation ancienne et les sols nus "steppiques", plus récents sont particulièrement bien identifiés sur le site de Gourga (figure 27).

Les zones cultivées sont correctement identifiées, à quelques erreurs de tracé près, sur les deux sites.

Tableau XVI : Corrélation entre variables radiométriques et recouvrement herbacé sur les segments de transects.

MATRICE DES CORRELATIONS

	minND	maxND	moyND	minBR	maxBR	moyBR	Rher
minND	1.0000						
maxND	0.5418	1.0000					
moyND	0.8269	0.8871	1.0000				
minBR	-0.3936	-0.7520	-0.6539	1.0000			
maxBR	-0.5074	-0.3226	-0.3865	0.6514	1.0000		
moyBR	-0.5368	-0.6630	-0.6586	0.9169	0.8500	1.0000	
Rherb	0.6054	0.6594	0.7269	-0.5449	-0.2506	-0.4788	1.0

seuil de signification à 1 % : 0.48

à 5 % : 0.37

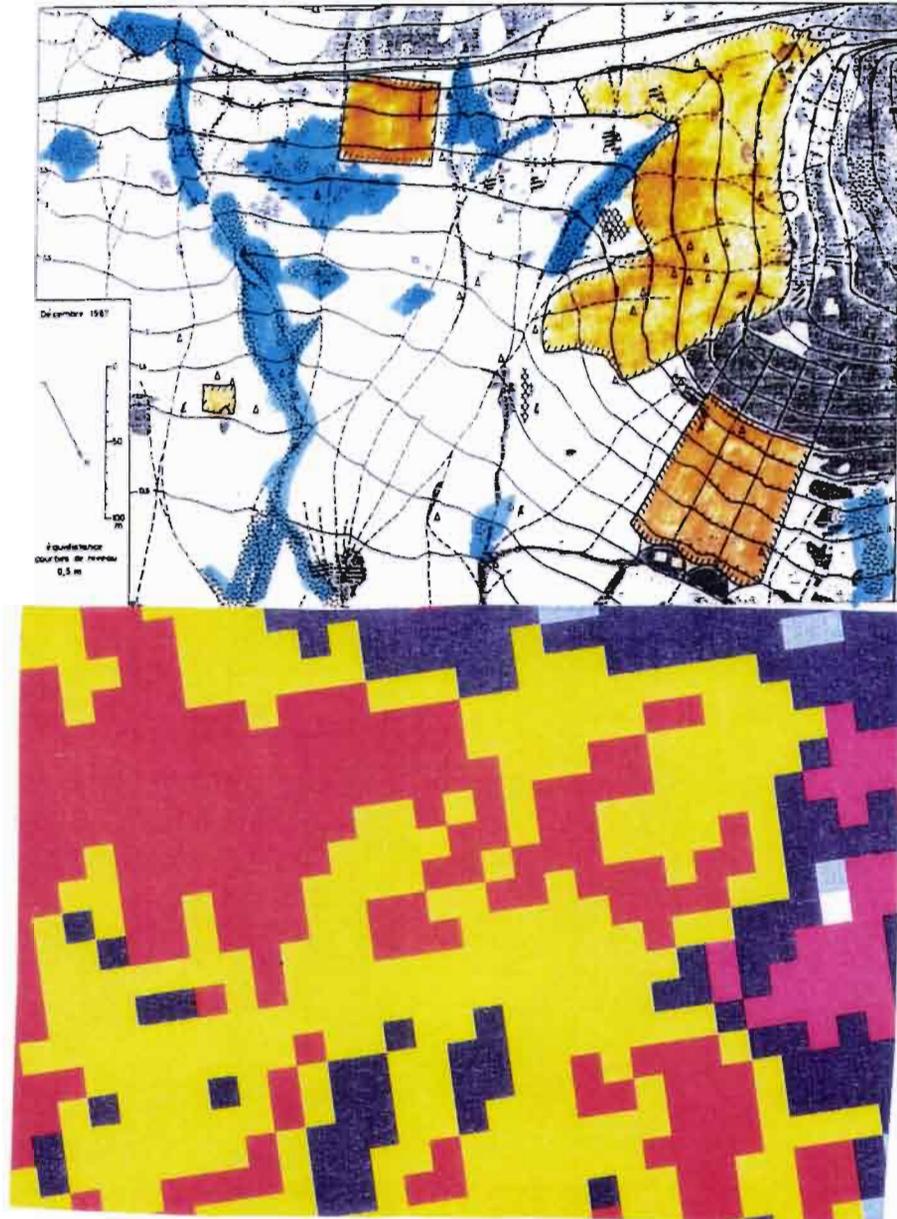
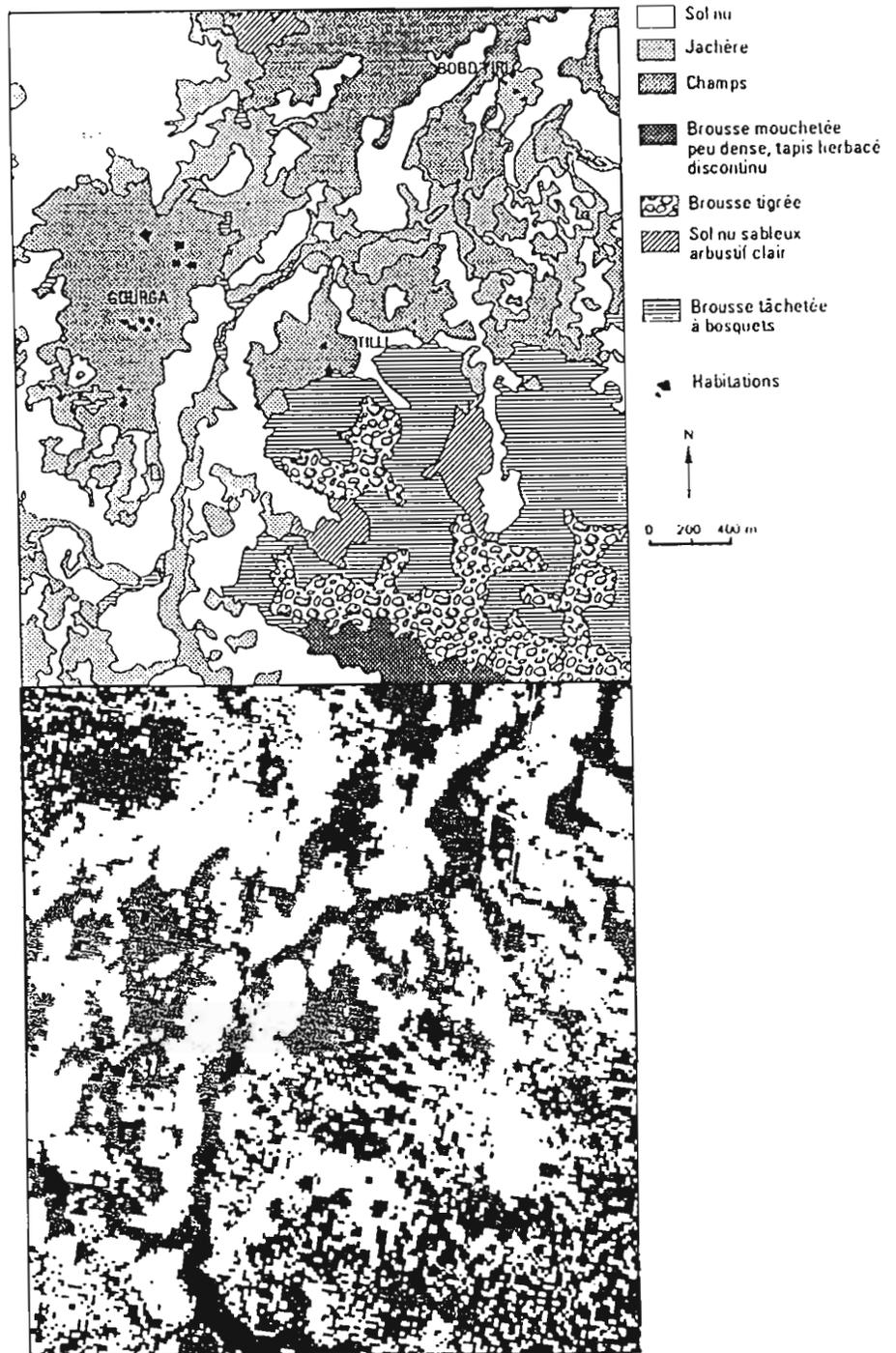


Figure 26 : Comparaison entre une cartographie au sol et par télédétection. Site de Samni.

Figure 27 : Comparaison entre une cartographie au sol et par télédétection. Site de Gourga- Tilli.



Cartographie par photo-interprétation sur photographies aériennes au 1/20 000 de saison humide 1984.

Cartographie par télédétection

6.5 Conclusion

Cette validation met en lumière la difficulté de trouver des descripteurs pratiques du milieu, confrontables aux thèmes de classement obtenus par classification supervisée. La technique du "transect" reste valide mais pourrait être avantageusement remplacée par la reconnaissance de zones étendues considérées comme représentatives d'une formation sur une première classification et un bon système de localisation (tel que le système GPS). On obtiendrait ainsi deux jeux de parcelles d'entraînement : les plus homogènes servant d'apprentissage au modèle de classification, les autres à sa validation.

7. CARTOGRAPHIE DES ZONES "HUMIDES" DES REGIONS GRANITIQUES ET SCHISTEUSES.

7.1 Objectifs

Cette facette de paysage qui accompagne le réseau hydrographique et les dépressions est particulièrement utile à cerner puisqu'elle joue une place importante dans le système de production. D'une part les cultures de Sorgho qu'on y trouve jouent un rôle de sécurité vivrière ; d'autre part les pâturages ligneux et herbacés de bas-fond tiennent le rôle de pâturage de soudure, en début de saison des pluies. La largeur du bas-fond, c'est à dire la zone inondable par les crues, renseigne sur la pente du bas-fond et ses qualités vis à vis des cultures. Un bas-fond large permet aux crues de s'étaler, ce qui limite leur impact mécanique sur les jeunes pousses. Trop large au contraire en situation de grand bassin-versant, les crues s'écoulent trop lentement et la seule spéculation possible est le riz, en culture extensive, remplacé par le pâturage en cas d'échec d'installation.

7.2 Méthode

L'existence d'un aquifère accessible aux racines de ligneux, le mode d'arrivée des pluies et le ruissellement qui converge vers les bas-fonds font que la végétation ligneuse et herbacée y sont les premières et les dernières à s'exprimer dans la saison pluvieuse. Ce phénomène a été abondamment décrit dans les parties 3 et 4. Comme le milieu de bas-fond est en outre assez homogène et sans relief, il se différencie d'autres situations localement précoces (bosquets par exemple) par l'extension spatiale et la continuité spatiale des conditions permettant l'expression d'une végétation précoce.

Le repérage de cette facette sera donc facilité en début de saison pluvieuse. L'image du 5/7/88 convient très bien et le seuillage réalisé sur NDVI pour les ligneux actifs dévoile en particulier ligneux de bas-fonds et prairies au stade plantules.

Pour différencier les bas-fonds des autres formations ligneuses, il faut exploiter la condition de continuité spatiale. Cette condition est traitable informatiquement par des algorithmes de Morphologie Mathématique binaire en trame carrée, tels qu'on peut les utiliser à partir de PLANETES (MERING, 88).

7.3 Traitement des images

L'image binaire obtenue par seuillage est traitée par deux voies successives : la Reconstruction puis le seuillage en fonction du diamètre géodésique.

La reconstruction est en général utilisée pour extraire d'une image des composantes connexes d'une épaisseur supérieure à celle de l'élément structurant choisi au départ. En érodant tout d'abord l'image originale, on élimine des ensembles suffisamment "petits". En "reconstruisant" l'image à l'aide d'un élément structurant de taille t (dilatation + intersection avec l'image d'origine), on restaure les composantes connexes dont le noyau n'a pas été éliminé par la première érosion. Ce processus est réitéré jusqu'à convergence. Autrement dit, le seul élément important déterminant est la connexité initiale des ensembles.

On peut même éliminer des ensembles de taille importante que l'on ne reconstruira pas si ils sont non connexes (la connexité n'est pas nécessairement perçue à l'oeil). A une étape donnée, le processus de reconstruction converge (idempotence de la transformation)

Soit B_x l'élément structurant utilisé (ici on a choisi un carré de taille 3). L'algorithme est le suivant :

soit X l'image binaire d'origine

$$1^\circ \text{ érosion de } X \text{ par } B_x \quad Y_1 = X - B_x$$

$$2^\circ \text{ dilatation de } Y_1 \text{ par } B_1 \quad Y_2 = Y_1 + B_1$$

$$3^\circ \text{ reconstruction} \quad Y_3 = Y_2 \cap X$$

$$4^{\circ} \text{ dilatation} \quad Y_4 = Y_3 + B_1$$

.....

$$n^{\circ} \text{ dilatation} \quad Y_n = Y_{n-1} + B_1$$

$$n+1^{\circ} \text{ reconstruction} \quad Y_{n+1} = Y_n \cap X$$

A une étape donnée du processus on a

$$Y_k = Y_{k-1} \cap X = Y_{k-1}$$

L'algorithme est en effet autoconvergent. Le seul paramètre à choisir est l'élément structurant initial. S'il est aussi grand que les composantes connexes que l'on veut extraire, on les élimine définitivement lors de l'érosion initiale. Le problème posé par les bas-fonds est qu'ils sont peu épais. Une simple reconstruction ne permet pas de les discriminer des bosquets ni d'autres ensembles aussi épais mais moins longs. Pour les discriminer de ces formes, on fait une reconstruction après érosion de taille 3, 3 (c'est à dire 60 m au sol) étant l'épaisseur de la plus petite des grosses composantes connexes à retenir.

L'autre problème est de discriminer les composantes "bas-fond linéaire" des autres "petites composantes". A priori ces dernières sont moins longues ("diamètre géodésique" moins important). Si ce critère est le bon, il suffit de filtrer l'image en fonction d'un seuil égal à leur diamètre géodésique.

La figure 28 fournit un détail de l'image binaire et la figure 29 le résultat de la reconstruction sur ce détail.

7.4 Description de l'image traitée

Dans les régions granitiques et schisteuses, apparaissent individualisées toutes les zones que l'on peut considérer comme "humides". On peut les classer visuellement en trois types de formation.

7.4.1. Les bas-fonds linéaires.

Ils correspondent au réseau hydrographique des zones "hautes" (zone de collines Birrimiennes au sud-est, zones granitiques, zones schisteuses). Les Thalwegs secondaires et bas-fonds de petits bassins-versant ont souvent une largeur insuffisante pour conserver après reconstruction la structure linéaire, d'autant que le seuil utilisé pour générer l'image binaire est trop sélectif. On reconnaît donc les principaux bas-fonds (correspondant à de grand bassin-versants) à leur continuité ; leurs affluents ou les petits bas-fonds sont identifiés par des successions linéaires de petites taches qui correspondent à des élargissements des bas-fonds.

7.4.2. Les "têtes de bas-fond".

La géomorphologie des zones granitiques favorise des structures d'interfluves circulaires "en demi-orange". Le réseau hydrographique "en baïonnette", individualisé et plus ou moins encaissé, se transforme vers l'amont en un faisceau de thalwegs constituant une cuvette terminale polyédrique. Ces cuvettes, très caractéristiques, ont conservé une végétation importante grâce à leur situation hydrique favorable dans une zone frontalière réservée au parcours. Seules sont dégradées les zones proches du drain central ("chanfreins"), à la suite d'installations humaines (forgerons Kibse) et de mises en culture anciennes.

7.4.3. les microendoréismes

Sur les interfluves les plus aplanis des zones granitiques , (plus sensibles que les schistes à l'érosion chimique) on trouve des surfaces planes, à très faible pente, dont le drainage superficiel est ralenti par des épandages sableux d'origine éolienne. Un exutoire en général rétréci permet l'évacuation d'eaux de ruissellement qui peuvent stagner plusieurs jours, laissant en de nombreux endroits des états de surface de type "décantation", mais aussi des mares. Ces zones ont conservé une végétation arbustive importante mais sont actuellement continuellement "grignotées par les défriches (sorgho et riz) malgré l'intérêt contraire des éleveurs et les difficultés de la mise en culture.

Ces formations se reconnaissent par des taches isolées ou anastomosées.



Figure 28: Axes de drainage et delta endoréique dans la région de BIDI. Image TM canal 3.

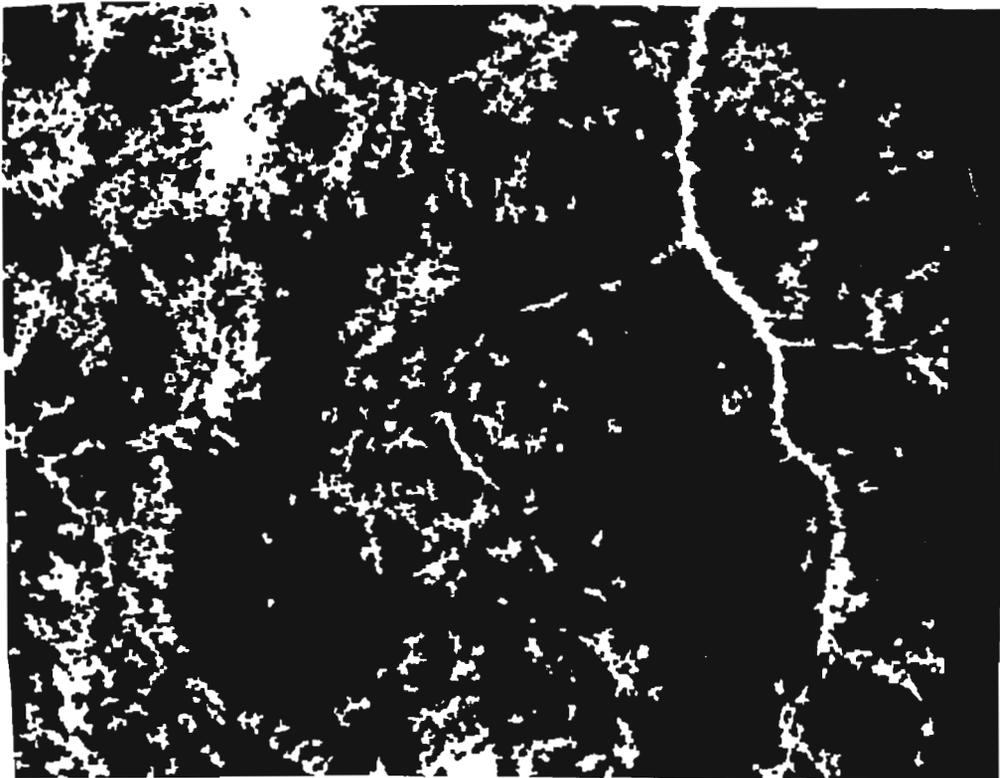


Figure 29 Extraction du thème "zones humides" par reconstruction d'une image binaire NDVI SPOT.

8. CONCLUSION

Nous ne proposerons qu'une conclusion partielle. En effet la cartographie des ressources en végétation se poursuit à l'ENGREF pour les deux autres fenêtres, Ouest et Nord, et l'interprétation de cette carte des ressources en végétation est à poursuivre.

Le choix d'images SPOT à haute résolution spatiale à des saisons intermédiaires est particulièrement adapté au thème retenu, en ce qu'il permet l'exploitation de différenciations phénologiques sur de petites distances. Le corollaire de cette adaptation est la grande sensibilité aux dates des pluies, qui empêche d'appliquer le même algorithme de classification à une scène entière d'une part, d'autre part exige de disposer de nombreuses données sol et d'une connaissance suffisante des processus qui gouvernent les changements d'état de la végétation aux changements de saison.

Un intérêt supplémentaire à la haute résolution spatiale est l'opportunité de traiter non seulement des variables radiométriques mais des variables de structure, telles que la recherche des zones humides nous en a donné l'aperçu. L'analyse de la carte élémentaire des ressources en végétation à des fins de cartographie de structure de la végétation pourrait exploiter cette opportunité selon les méthodes développées par MERING dans RAKOTO et al (1988) et JACQUEMINET et al (1990).

BIBLIOGRAPHIE

AMAN (A.), LAVENU (F.), PODAIRE (A.), SAINT (G.), MENAUT (J.C.), PUYRAVAUD (J.Ph.), MERSADIER (G.), SERPANTIE (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L.). 1989. Etude de la production primaire de différentes savanes. Apport des images à haute résolution SPOT XS et LANDSAT TM. in Bul. S.F.P.T n° 114 (1989-2) pp 40-44.

AMAN (A.), LAVENU (F.), PODAIRE (A.), SAINT (G.), MENAUT (J.C.), PUYRAVAUD (J.Ph.), MERSADIER (G.), SERPANTIE (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L.). 1989 Biological rhythms of the sudanosahelian vegetation types. 30p + annexes mult. LERTS

BEGUE (A.)-1991. Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiométriques. Thèse U. Paris VII. 138 p.

BOUDET (G.)- 1972. Désertification de l'Afrique tropicale sèche. in Adansonia, série 2, pp 205-224, 12, 4.

CASENAVE(A.), VALENTIN (C.)- 1990 . Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM Collection Didactiques. 280 p.

COURAULT(D.), D'HERBES (J.M.), VALENTIN (C.)- 1991. Caractéristiques spectrales des principales organisations de la surface des sols au Niger. p 39-48.in "Caractérisation et suivi des milieux terrestres en région aride et tropicale" coll. ORSTOM "Colloques et séminaires" pp 373-386.

DEVINEAU (J.L.), SERPANTIE (G.)- 1990 : Projet SALT . Paysages végétaux et systèmes agraires au Burkina Faso. in "Caractérisation et suivi des milieux terrestres en région aride et tropicale" coll. ORSTOM "Colloques et séminaires" p 373-386.

ESCADAFAL (R.) et HUETE (A.), 1991. Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. in C.R. Acad.Sci.Paris, T 312, Sér. II, p 1385-1391.

GROUZIS (M.)- 1987. Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens. Thèse U. Paris Sud 293 p + annexes.

JACQUEMINET (C.)- 1990. Des indicateurs morphologiques pour mesurer le changement des milieux sahéliens à partir des images satellitaires à haute résolution. in Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Ed.. AUPELF. A.S.p 129-144.

JACQUEMINET (C.), MERING (C.), PONCET (Y.), COUREL (M.F.)- 1989. Etude quantitative des formes d'organisation spatiale du couvert ligneux en milieu sahélien à partir des images satellitaires Spot.p 20-22.in Bul. S.F.P.T n° 114 (1989-2). p 20-22.

MARCHAL (J.Y.)- 1983. Le Yatenga. La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien. Coll.. ORSTOM Travx et doc.n° 130. 569 p.

PUECH (C.), CARETTE (J.)- 1989. Apport de la télédétection à l'aménagement de petits bassins-versants en Afrique soudano-sahélienne Rapport CEMAGREF, 100 pp + annexes.

RAKOTO (M.), ANDRIANASOLO (H.), MERING (C.), 1988. Guide de l'utilisateur de PLANETES. ORSTOM LIA. Multigr.130 p.

SERPANTIE (G.), MERSADIER (G.), TEZENAS DU MONTCEL (L). 1989
Etude diachronique de la végétation en zone soudano-sahélienne. Suivi de zones sensibles au Yatenga.(Burkina Faso). Document de travail ORSTOM. mult. 163 p + annexes.

TEZENAS du MONTCEL (L.). 1992 : Cycle biologique des espèces ligneuses en zone soudano-sahélienne. Rapport à paraître