

DISCRIMINATION DE DIFFÉRENTES COUVERTURES VÉGÉTALES PAR RADIOMÉTRIE DE TERRAIN EN SAVANE SOUDANO-SAHÉLIENNE

L. SÉGUI¹, C. BOSCHER², J. ALBERGEL¹

RÉSUMÉ

L'étude a consisté à déterminer une méthode de discrimination de différents types de végétation (mil, arachide et jachère) et de suivi de leur développement saisonnier. Ce travail s'inscrit dans la recherche des minoration à apporter aux fonctions de production (pluie-lame ruisselée) des sols nus de début d'hivernage, pour différents types de couvert se développant au cours de la saison des pluies. Durant l'hivernage 1993, les réflectances (canaux Spot) de 19 parcelles (100 m²) en milieu paysan ont été régulièrement mesurées au moyen d'un radiomètre Cimel CE310. Dix des parcelles étaient semées en mil, six en arachide, les deux dernières étaient en végétation naturelle. Pour certaines des parcelles de mil, un indice de surface foliaire a été calculé par mesure au champ. Différents indices de végétation utilisés classiquement en télédétection (*N.D.V.I*, *P.V.I.*, *S.A.V.I.*, *T.S.A.V.I.*) ont été comparés à l'indice de surface foliaire; le *T.S.A.V.I.* rend le mieux compte de l'évolution saisonnière de la végétation. Mil et arachide se distinguent surtout en fin d'hivernage, la baisse de l'indice (sénescence) étant plus rapide pour le mil que l'arachide. Quelle que soit l'importance du recouvrement, la végétation naturelle (graminées) présente en phase maximale des indices radiométriques quasiment constants durant 40 à 60 jours. Ces premiers résultats ouvrent la voie à une discrimination non plus uniquement spectrale mais spectro-temporelle des couverts végétaux. Durant l'hivernage 1994, l'expérimentation

¹Orstom B.P. 1386 Dakar - Sénégal.

²Cirad-Isra Kaolack - Sénégal.

sera renouvelée pour évaluer l'importance des fluctuations interannuelles sur la forme générale des courbes décrites. Elle se doublera de mesures de ruissellement en parcelles pour différents couverts (sol constamment dénudé, végétation naturelle, mil et arachide) afin d'intégrer un indice de végétation dans les fonctions de production. À terme, ces résultats seront transposés à l'imagerie satellitaire.

INTRODUCTION

Classiquement, l'importance et l'intensité du ruissellement, en un site restreint, sont expliquées par des facteurs relativement constants et intrinsèques (topographie, nature du sol), des facteurs contingents (hyétogramme de la précipitation, stock hydrique) et des facteurs évolutifs (état de surface, couvert végétal). Au sud du Sahel, l'évolution saisonnière du couvert végétal apparaît comme l'un des facteurs primordiaux : de nombreux auteurs (RODIER, 1986, ALBERGEL, 1988) ont attribué les forts coefficients d'écoulement de début d'hivernage aux sols encore dénudés à cette date. Plus précisément, en zone soudanienne (précipitation annuelle comprise entre 400 et 900 mm), si le milieu naturel n'est pas surpâturé, l'activité faunique associée à l'herbe sèche de la précédente saison des pluies diminue déjà le ruissellement en début d'hivernage. Par contre, dans les zones rurales densément peuplées, les cultures occupent l'essentiel du paysage et les travaux avant semis, soit avant les premières pluies, entraînent une dénudation complète. Deux mois plus tard (mi-août), le recouvrement végétal atteint 80 à 100 %. CASENAVE et VALENTIN (1989) ont ainsi proposé de minorer les fonctions de production (pluie-lame ruisselée) pour un état de surface donné au delà d'un seuil de 50 % de couverture végétale. THEBE (1987) a directement introduit le pourcentage de couvert végétal comme variable explicative dans la fonction de production de petits bassins du Nord-Cameroun. La nature du couvert végétal à travers son port doit aussi être prise en compte : PEREZ (1994) a ainsi observé de plus faibles coefficients de ruissellement sous couvert d'arachide que de mil. Pour déterminer, quantifier et suivre l'évolution du couvert végétal, l'utilisation de l'imagerie satellitaire (Spot) par sa résolution spatiale et temporelle apparaît prometteuse. Pour élaborer une méthodologie de discrimination des couverts végétaux, la radiométrie de terrain était une étape indispensable. Dans cet article, nous présentons les premiers résultats de la campagne de mesures effectuée dans le sud du bassin arachidier sénégalais au cours de l'hivernage 1993.

SITUATION ET PROTOCOLE DE MESURE

Le site d'étude, au sud du Sine Saloum à proximité de la frontière gambienne, se caractérisait originellement par une savane arborée. Depuis une vingtaine d'années, sous les actions conjuguées d'une forte pression démographique

(68 hab./km² en 1983) et de la vulgarisation de la traction attelée, les surfaces cultivées sont devenues majoritaires aux dépens des surfaces naturelles (forêts et jachères) (79 % en 1992 contre 22 % en 1970) (MONIMEAU, 1992). En 1993, les précipitations ont été de 795 mm soit une valeur médiane sur l'échantillon des pluies annuelles 1950-1992 (ALBERGEL *et al.*, 1991). Sur toute la saison, aucune période de déficit hydrique n'a été enregistrée du fait d'un étalement homogène des précipitations (figure 1). Par conséquent, l'alimentation satisfaisante en eau des cultures a permis de bons rendements.

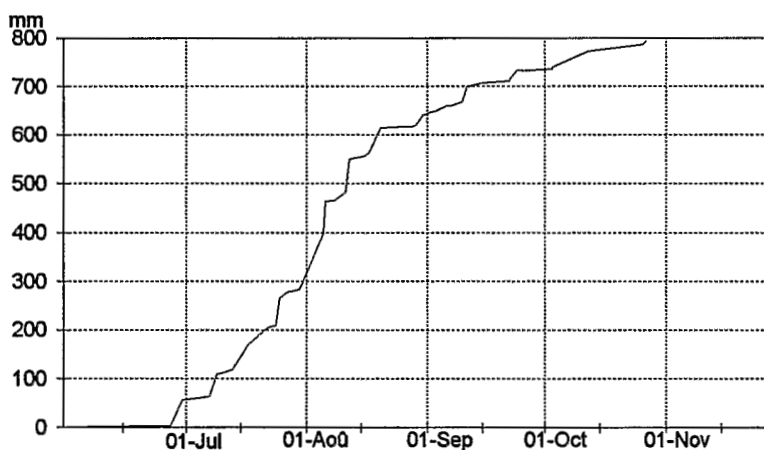


Figure 1 :
Précipitations journalières cumulées en 1993.

L'étude a porté sur dix parcelles de mil, six d'arachide et trois caractéristiques des zones naturelles (cuiresse, surface mise en défens). Les parcelles, orientées selon les lignes de semis, mesurent 100 m² (5 x 20). La germination s'est déroulée après la première pluie utile (supérieure à 20 mm) du 29 juin. Le mil a été récolté au début octobre et l'arachide, un mois plus tard. Les mesures radiométriques ont été réalisées mensuellement au moyen d'un radiomètre CIMEL CE310 délivrant les réflectances Spot ((GUYOT *et al.*, 1984) (C1=0,50-0,59 μm ; C2=0,615-0,68 μm ; C3=0,79-0,89 μm). La tête de mesure étant à 2,7 m du sol, la surface visée avait un diamètre d'environ 50 cm. Les mesures ont été réalisées sur des bandes transversales à 2, 7, 12 et 17 m d'un petit côté (36 points). Les valeurs moyennes de réflectance dans les trois canaux définissent la signature spectrale de la parcelle. Sur certaines des parcelles de mil, le recouvrement puis un indice de surface foliaire (I.S.F.) ont été mesurés. Le recouvrement R s'effectue à l'aide d'une corde marquée de 100 traits équidistants et tendus

ont été réalisées sur des bandes transversales à 2, 7, 12 et 17 m d'un petit côté (36 points). Les valeurs moyennes de réflectance dans les trois canaux définissent la signature spectrale de la parcelle. Sur certaines des parcelles de mil, le recouvrement puis un indice de surface foliaire (I.S.F.) ont été mesurés. Le recouvrement R s'effectue à l'aide d'une corde marquée de 100 traits équidistants et tendus au-dessus des rangs de mil. À l'aplomb de chaque trait, on note la présence ou l'absence de la plante. On procède à trois répétitions. Le dénombrement est assimilé à un pourcentage de recouvrement.

Les mesures de I.S.F. sont effectuées par la méthode « longueur(L)-largeur(la) ». Pour l'application de cette méthode, on distingue les feuilles du bas du poquet, celles du milieu et celles du haut. Pour chaque groupe, on compte le nombre total de feuilles N et on mesure La et L sur 5 à 6 feuilles de manière à obtenir le produit moyen $La \times L$ du groupe. La surface moyenne de chaque groupe est donnée par :

$$\bar{S}(\text{cm}^2) = N \times [0,751 \times (\overline{L \times La}) + 0,146] \quad (L \text{ et } La \text{ en cm})$$

(Protocole ISRA, Bambey)

La surface de feuilles d'un poquet, Sp , s'obtient en sommant les surfaces \bar{S} de chaque groupe. Pour chaque parcelle, on effectue cette mesure sur 1 à 3 poquets les plus représentatifs du reste de la parcelle puis on calcule la moyenne \overline{Sp} . L'indice de surface foliaire représente le pourcentage de surface de feuille par rapport à la superficie de la parcelle.

$$I.S.F. = \frac{N_{\text{poquet}} \times \overline{Sp}}{S_{\text{parcelle}}}$$

RAPPEL SUR DIFFÉRENTS INDICES RADIOMÉTRIQUES DE VÉGÉTATION ET JUSTIFICATION PAR COMPARAISON AUX INDICES AGRONOMIQUES (R ET I.S.F.)

De nombreux indices radiométriques de végétation existent. Ils font intervenir le canal rouge (C2) et proche infrarouge (C3) dans des formules dont la complexité croissante vise à réduire l'influence du sol sur le signal de la végétation. Quatre indices ont été calculés : les trois premiers sont des mesures de pente (N.D.V.I., S.A.V.I., T.S.A.V.I.), le dernier est une distance (P.V.I.) (figure 2).

— N.D.V.I. (normalized difference vegetation index)

$$N.D.V.I. = \frac{R_3 - R_2}{R_3 + R_2} \quad (\text{PEARSON et MILLER, 1972})$$

N.D.V.I. est lié à la pente entre l'axe des abscisses (Rouge) et la droite reliant l'origine au point de végétation de coordonnées (R_2, R_3) ;

— *S.A.V.I.* (*soil-adjusted vegetation index*)

$$S.A.V.I. = \frac{R_3 - R_2}{R_3 + R_2 + L} \times (1 + L) \quad (\text{HUETE, 1988})$$

S.A.V.I. est lié à la pente de la droite qui joint le point de coordonnées (R_2, R_3) au point de coordonnées $(-L/2, -L/2)$. Pour une végétation moyenne, L est pris égal à 0,5.

— *T.S.A.V.I.* (*transformed soil-adjusted vegetation index*)

$$T.S.A.V.I. = a \times \frac{(R_3 - a \times R_2 - b)}{[a \times R_3 + R_2 - a \times b + X \times (1 + a^2)]} \quad (\text{BARET et al., 1989})$$

1989)

(modifié par BARET et GUYOT, 1991)

T.S.A.V.I. est lié à l'angle entre la droite reliant le point de coordonnées (R_2, R_3) au point de coordonnées $(0, b)$ et la droite des sols nus de pente a et d'interception à l'origine b . Nous rappelons que dans le plan rouge-proche infrarouge, les points de sols nus s'alignent : la pente est proche de 1 et l'ordonnée à l'origine proche de 0. X est pris égal à 0,08.

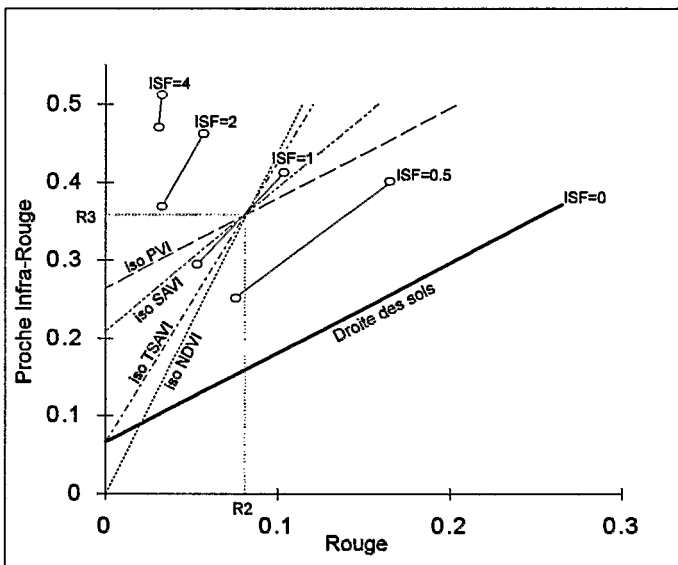


Figure 2 :

Lignes d'isovégétation (*I.S.F.*) et lignes d'isovaleurs pour différents indices de végétation (*N.D.V.I.*, *S.A.V.I.*, *T.S.A.V.I.*, *P.V.I.*) dans le plan des réflectances. Rouge - Proche infrarouge (source : BARET et al., 1989).

Le calcul des trois derniers indices nécessitent la connaissance de la droite des sols nus (figure 3). L'équation suivante a été établie après une campagne radiométrique en fin de saison sèche (juin 1993) :

$$P.I.R. = 1,166 \times R + 0,205$$

pour tous les états de surfaces de *N.D.V.I.* inférieur à 0,12 (assimilés à des sols nus).

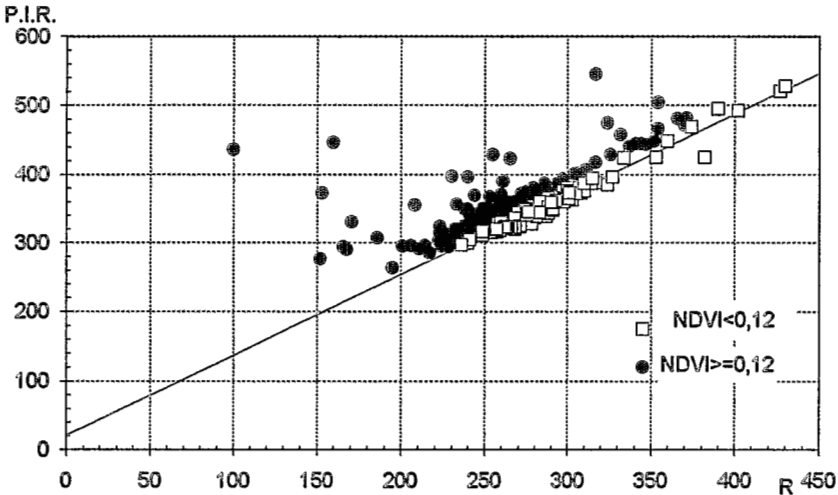


Figure 3 :

Droite des sols dans le plan des réflectances Rouge - Proche infrarouge (exprimées en ‰).

Pour une parcelle de mil, la figure 4 superpose les évolutions des quatre indices de végétation sur le cycle du mil représenté par le recouvrement et l'indice de surface foliaire (*I.S.F.*). En premier lieu, on constate que la fréquence des mesures radiométriques, mensuelle, est insuffisante pour rendre compte au mieux du développement végétatif. En second lieu, *I.S.F.* n'étant calculé qu'à partir des feuilles vertes, il chute fortement en fin de cycle. Les indices radiométriques diminuent moins rapidement car en relation avec la phase de sénescence du mil, des adventices se développent et assurent au sol un nouveau couvert végétal. Comme l'indique la figure 2 et de nombreuses expérimentations en station agronomique sur des sols de brillance variée (HUETE *et al.*, 1985 ; HUETE et JACKSON 1987), les indices radiométriques de végétation sont imparfaits à décorréler le signal de la végétation de celui du sol. Parmi les quatre indices, *T.S.A.V.I* et *P.V.I.* sont les meilleurs indicateurs de l'absence de couvert en début d'hivernage. Nous avons retenu l'indice *T.S.A.V.I* pour la suite de notre travail car il recoupe une

notion d'angle comme *N.D.V.I.* fréquemment utilisé (à la différence de *P.V.I.* représentant une distance), et car des études de sensibilité (BARET et GUYOT, 1991, BARET *et al.*, 1989) ont montré l'indépendance plus grande de cet indice à la brillance des sols.

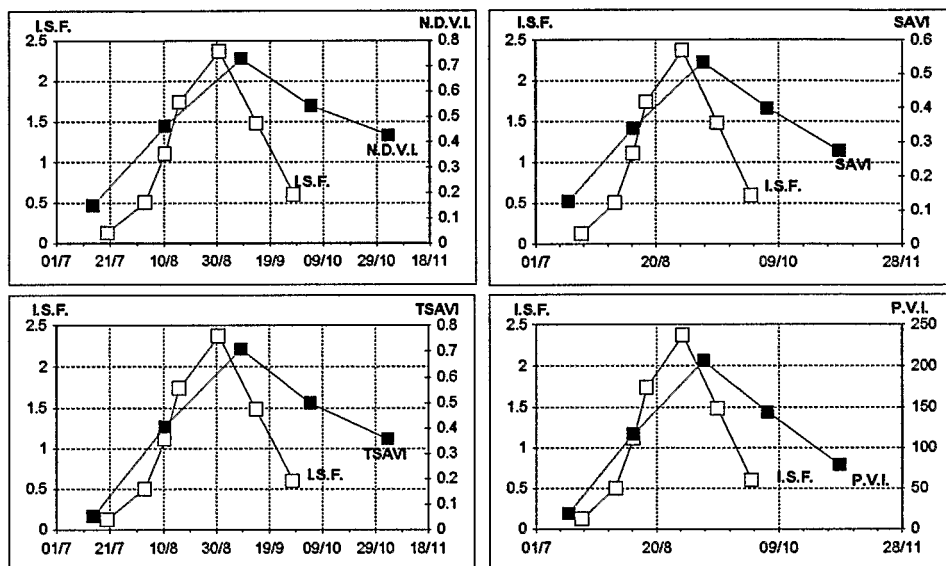


Figure 4 :

Dynamique des divers indices radiométriques de végétation (N.D.V.I., S.A.V.I., T.S.A.V.I., P.V.I.) par rapport à l'indice de surface foliaire (I.S.F.).

ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DE L'INDICE DE VÉGÉTATION T.S.A.V.I.

L'évolution des coefficients de variation du rouge et du proche infrarouge pour chaque culture et chaque parcelle est présentée dans les graphes de la figure 5. Les coefficients de variation des deux cultures sont faibles et présentent une dispersion moindre en début et fin de cycle. Pour les deux cultures, cette homogénéité correspond à des mesures sur sols nus en début d'hivernage et également en fin d'hivernage pour l'arachide. Le développement des adventices en fin de cycle et après récolte explique la faible dispersion des parcelles de mil. En août et septembre, la dispersion est la plus forte. Ceci résulte :

- de développements végétatifs variés en fonction de la qualité des travaux culturaux (fumure, sarclage etc.) ;

- de l'égalité de taille entre la surface de mesure (disque de 50 cm de diamètre) et les surfaces radiométriquement homogènes (intersillon dénudé ou poquet chlorophyllien). À l'échelle de la mesure satellitaire (surface de 400 m²), cette dispersion disparaîtra.

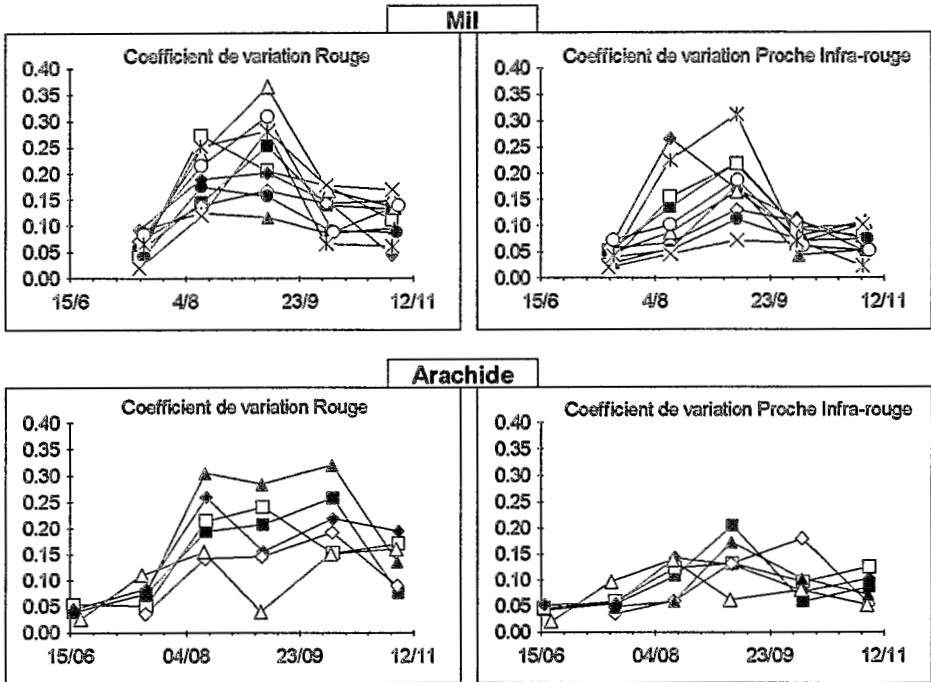


Figure 5 :

Évolution des coefficients de variation dans le rouge et le proche infrarouge des parcelles en mil et arachide au cours de l'hivernage 1993
(légende des parcelles sur la figure 6).

L'évolution saisonnière du *T.S.A.V.I.* pour chacune des parcelles regroupées dans trois thèmes (champ de mil, champ d'arachide et milieu naturel) est présentée dans la figure 6. Les trois couverts ont des évolutions similaires jusqu'au 8 septembre, les valeurs de l'indice sont légèrement plus fortes pour l'arachide que pour le mil en septembre. Mais, le signal d'une bonne couverture végétale de mil est comparable à celui d'une mauvaise d'arachide. Du 8 septembre au 5 octobre, la sénescence du mil entraîne une diminution importante de *T.S.A.V.I.* à la différence de l'arachide de cycle plus long. Pour l'arachide, de septembre à octobre, les valeurs de *T.S.A.V.I.* se maintiennent. Début octobre, le mil est récolté manuellement par couchage et prélèvement des épis. Les pailles restent au sol et des adventices se développent. *T.S.A.V.I.* diminue peu et augmente même légèrement pour une parcelle (PKEB).

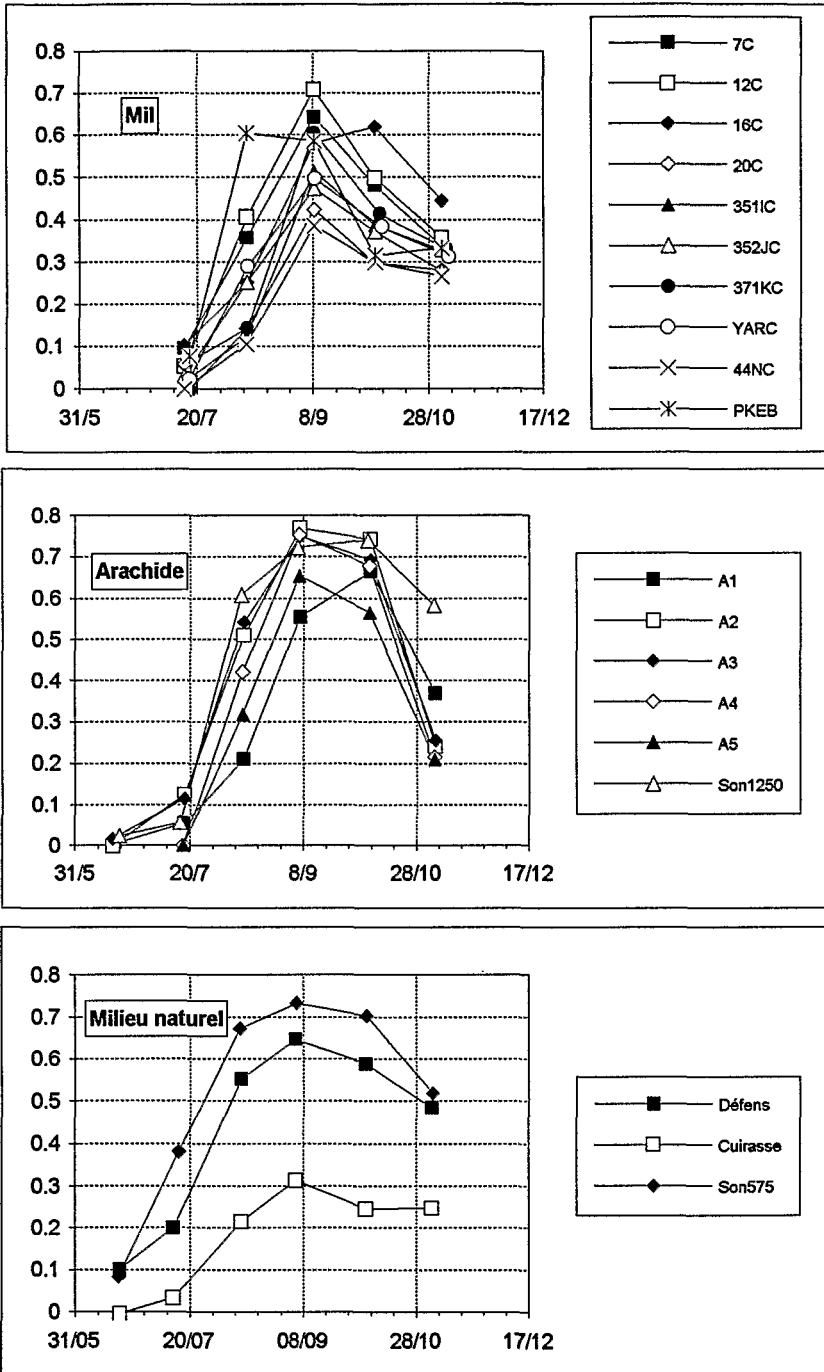


Figure 6 :
Évolution de T.S.A.V.I. pour les couverts en mil, arachide et végétation naturelle au cours de l'hivernage 1993.

Par contre, début novembre, l'arachide vient d'être récolté par soulèvement mécanisé et les fanes sont regroupées en meule. Le terrain est meuble et dénudé, le *T.S.A.V.I.* passe de 0,6 à 0,2 environ. Deux parcelles de mil et d'arachide s'écartent de ce schéma. La parcelle d'arachide Son 1250 n'a pas été récoltée au début novembre, la faible diminution du *T.S.A.V.I.* d'octobre à novembre provient du flétrissement des feuilles. Le *T.S.A.V.I.* de la parcelle de mil 16C augmente de septembre à début octobre car l'herbe a largement supplanté le mil dans la parcelle. Les parcelles du milieu naturel correspondent à deux extrêmes : d'une part, une zone mise en défens depuis 1983 (Défens) et une prairie (Son 1250) et d'autre part, une zone recouverte d'une croûte d'érosion avec des recouvrements algaires (Cuirasse). Dans les deux cas, le maximum de couverture végétale est établie au début août. Jusqu'en fin novembre, le *T.S.A.V.I.* diminue faiblement.

RECHERCHE D'UNE MÉTHODE DE DISCRIMINATION DES COUVERTS

Quelle que soit la date considérée, la valeur du *T.S.A.V.I.* permet difficilement la détermination du couvert. Par contre, l'évolution des *T.S.A.V.I.* à partir du début août est distincte d'un couvert à l'autre. La classification doit donc s'effectuer selon la forme de la courbe de *T.S.A.V.I.* Pour des cultures de soja et de maïs, HALL et BADHWAR (1987) avaient approché la forme de la courbe par une fonction en cloche à trois paramètres (caractéristiques de la durée du cycle végétatif, de la date du maximum et de sa valeur). Les valeurs des 3 paramètres permettaient ensuite une classification. La forte dissymétrie de nos courbes d'évolution du *T.S.A.V.I.* était très mal rendue par cette fonction. La simple évolution des pentes du *T.S.A.V.I.* entre août et novembre permet de différencier les couverts (figure 7). La pente de *T.S.A.V.I.* entre août et septembre est fortement négative pour le mil. La décroissance est en général beaucoup plus faible pour l'arachide et pour le milieu naturel. D'octobre à novembre, la pente est forte pour les champs d'arachide et faible à nulle voire positive pour les champs de mil et le milieu naturel. Le mil de la parcelle PKEB a crû plus rapidement du fait d'une forte fumure. La pente de *T.S.A.V.I.* est nulle en août car la croissance s'est déroulée entre juillet et août. L'enherbement très important de la parcelle 16C explique la pente positive de *T.S.A.V.I.* entre septembre et octobre.

Les pentes de chacun des mois sont seuillées (3 valeurs de seuil par mois, pour séparer les pentes fortement négative, faiblement négative, faiblement positive et fortement positive). Les 12 intervalles (3×4) définies sont codifiés (tableau 1).

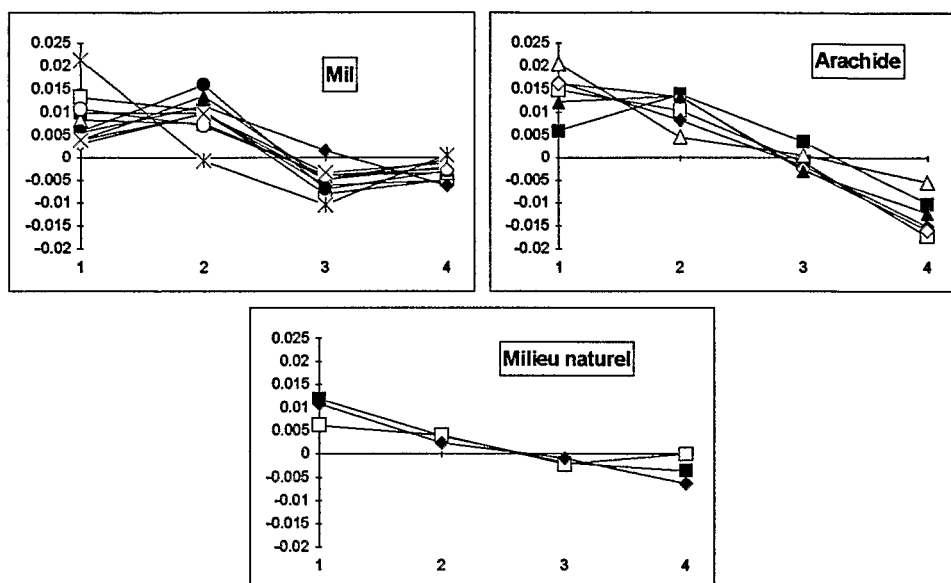


Figure 7 :
Évolution des pentes de T.S.A.V.I. entre les mois de juillet-août (1), août-septembre (2), septembre-octobre (3) et octobre-novembre (4) pour les différents couverts.

Tableau 1
Codification des pentes (T.S.A.V.I. /jour) août-septembre, septembre-octobre, octobre-novembre

Pente	Pente 08-09	Pente 09-10	Pente 10-11
-			
-0,005	D	H	L
-0,0035	C	G	K
0	A	E	I
0,003		F	J
0,005	B		
+			

Toutes les combinaisons de pente ne sont pas envisageables. Aux combinaisons rencontrées en 1993 (en gras), nous avons ajouté dans le tableau 2 des combinaisons résultant d'une fin précoce d'hivernage entraînant une forte baisse de *T.S.A.V.I.* d'octobre à novembre.

Tableau 2

Classification des couverts en fonction des combinaisons de pente de *T.S.A.V.I.* (en gras, combinaisons rencontrés en 1993)

Mil	Arachide	Couvert naturel
BHJ	AEL	AEK
BHI	BEL	AEL
BHK	BFL	BEK
BHL	BGL	CEK
CHI	AGL	CEL
CHK		BGI
AHI		AGI
AHJ		AGK
AHK		AGL
AHL		

En 1993, la parcelle de mil 16C est codifiée BEL, elle a un comportement effectivement similaire à celui d'un couvert d'arachide. La codification de toutes les autres parcelles correspond à l'occupation.

CONCLUSION

La méthode de classification proposée n'est encore qu'une ébauche. Son principe est le suivi de la phase de sénescence du couvert. Des observations de l'hivernage 1993, il se dégage que la première mesure dans l'objectif d'une classification du couvert végétal est à effectuer début août (150 à 200 mm de précipitation cumulée). Trois autres mesures espacées d'un mois sont nécessaires, la dernière devant impérativement suivre la récolte de l'arachide (environ quatre mois et demi après le début de l'hivernage). Durant l'hivernage 1994, les observations de terrain seront reconduites sur une zone plus étendue (les parcelles s'inscrivent dans un cercle de 2 km de rayon) afin d'évaluer la faible variabilité des formes de courbe de *T.S.A.V.I.* des différents couverts pour des distributions de précipitation légèrement différentes. Les seuils de codification des pentes de *T.S.A.V.I.* devront également être vérifiés. Quatre prises de vue satellitaires serviront à transposer la méthode à l'imagerie spatiale. Parallèlement, des mesures hydrologiques en parcelles (50 m²) pour différents couverts (sol dénudé chimiquement, végétation naturelle, mil et arachide) permettront d'évaluer la possibilité d'intégrer un indice radiométrique de végétation dans la modélisation du ruissellement.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL, J., 1988. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Coll. Études et Thèses, Orstom éd., Paris, 341 p.
- ALBERGEL, J., PEREZ, P., VAKSMANN M., 1991. Amélioration des modèles du bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. In Soil Water balance in the soudano-sahelian zone (Proc. of the Niamey workshop), février 1991, *I.A.S.H.*, n°199, 483-496.
- BARET F., GUYOT G., MAJOR D.J., 1989. *T.S.A.V.I.* : a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. in Proc. of the 12th canadian Symp. on Remote Sensing, IGARSS'90, Vancouver, Canada, 10-14 juillet 1989., 1355-1358.
- BARET, F., GUYOT G., 1991. Potentials in limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161-173.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Coll. Didactiques, Orstom éd., Paris, 229 p..
- GUYOT G., HANOCQ J.F., BUIS J.P., SAINT G., 1984. Mise au point d'un radiomètre de simulation de Spot. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Bordeaux, France, septembre 1983, Éditeur Inra, 233-242.
- HALL F.G., BADHWAR G.D., 1987. Signature-Extendable Technology : Global Space-Based Crop Recognition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25, 1, 93-103.
- HUETE A.R., JACKSON R.D., POST D.F., 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 17, 37-53.
- HUETE A.R., JACKSON R.D., 1987. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. *Remote Sensing of Environment*, 23, 213-232.

- HUETE A.R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (S.A.V.I.). *Remote sensing of environment*, 25, 295-309.
- MONIMEAU A., 1992. Projet d'aménagement de la ravine de Sonkonrong. Perspectives pour un aménagement intégré d'un bassin versant. Siné-Saloum, Sénégal. Mémoire d'ing. Cnearc-Esat, Montpellier, 65 p. plus annexes.
- PEARSON R., MILLER L.D., 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass Prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado.
- PEREZ P., 1994. Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du sud Saloum (Sénégal). Du diagnostic à l'aménagement de parcelle. Thèse de doctorat sci. agronom., Ensa, Montpellier, 250 p.
- RICHARDSON A.J., WIEGAND C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 43, n°12, 1541-1552.
- RODIER J.A., 1986. Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, vol. XX1, n°2, 3-26 plus annexes.
- THEBE B., 1987. Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse de doctorat sci. hydrol., U.S.T.L. Montpellier, 306 p.