

CARACTERISTIQUES SPECTRALES D'UNE PEDOSEQUENCE EN REGION TROPICALE (PLATEAU CENTRAL BRESILIEN)

José DA SILVA MADEIRA NETTO

INTRODUCTION

Dans les Cerrados sur le plateau central brésilien, les couvertures diagnostiques que pour la surface, sont de bons indicateurs des variations pédologiques (MACEDO, 1987).

ESCADAFAL (1989) a montré que les couleurs du sol, mesurées dans le système RGB, sont bien corrélées avec les données des canaux du domaine du visible pour une image LANDSAT TM. Ce même auteur a mis en évidence, pour un ensemble considérable d'échantillons de sols, l'absence du phénomène de métamérisme. Ces résultats permettent de formuler une hypothèse selon laquelle les variations de couleur des séquences à latosols peuvent être détectées à partir des images TM, et par conséquent, que celles-ci peuvent devenir un instrument très utile à la cartographie pédologique.

Dans la région centre-ouest du Brésil, de grandes étendues de terres sont cultivées en céréales et, après la récolte, les jachères permettent la visualisation de la surface du sol, et par conséquent, de la couleur

jusqu'au moment des labours. Les opérations successives de préparation du sol enfouissent la paille et introduisent une rugosité, propre au type de machine utilisée. La rugosité produit des ombres qui affectent la réflectance des sols. A l'approche du semis les champs présentent une certaine régularité à la surface, mais cela correspond aussi au début de la saison des pluies. Plusieurs études ont montré que la réflectance de la surface des sols est sensible à ces facteurs agroclimatiques (CELIS-CELISTERS, 1980; BOWERS et HANKS, 1964; KING, 1983; CIPRA et al 1971; CONDIT, 1970). Les effets de l'humidité et de la rugosité sur la réflectance varient selon les types de sols et peuvent jouer dans le sens d'une réduction de la

sols. KING (1983), devant l'absence d'un modèle permettant de prévoir ces effets, recommande que pour chaque situation, il est important d'étudier l'importance de la variabilité des réponses due à cette conjoncture par rapport à l'information pertinente pour le pédologue.

Ce travail a pour objectif d'étudier les réponses spectrales des sols d'une pédoséquence située à proximité de Brasilia, sur le plateau central brésilien, et de préciser les effets de la rugosité, produite par la préparation du sol, et de l'humidité sur la réflectance bidirectionnelle des sols .

MATERIELS ET METHODES

L'étude a été menée dans le Centro de Pesquisas Agropecuarias dos Cerrados (CPAC/EMBRAPA) situé dans le District Fédéral du Brésil sur une pédoséquence de sols ferrallitiques et hydromorphes: Latosol Vermelho Escuro (LVE), Latosol Vermelho Amarelo (LVA), Laterita Hidromorfica (HL) et sol à gley peu humique (GPH). L'étude pédologique de cette séquence a mis en évidence que les variations latérales observées sont surtout fonction de la profondeur de la nappe phréatique qui varie de quelques centimètres pour les sols à gley peu humique à plus de 10 mètres pour le Latosol Vermelho Escuro.

Les données de radiance ont été mesurées avec un radiomètre portatif ABBE SEKEI 120 développé par l'Institute of Color Technology- Chiba University, Japan. Cet instrument permet les mesures de radiance entre 400 et 800 nm (pas de 25 nm) et entre 800 et 1050 nm (pas de 50 nm). Pour ce travail, nous avons considéré les longueurs d'onde de 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 850, 950, et 1050 nm. L'angle d'ouverture de l'appareil est de 10° et les angles azimutal et de visée sont de 0°. L'appareil était placé à une hauteur de 3,3 metres, et la surface de la cible était de 0,25m². Les mesures ont été réalisées entre 9h30 et 12h30 durant la période du 22/04/87 au 12/08/87, uniquement les jours où le ciel était bien dégagé. La procédure de mesure utilisée consistait à lire, alternativement et pour chaque longueur d'onde, la radiance des cibles et de l'étalon constitué par une plaque peinte au sulfate de baryum (BaSO₄). Les facteurs de réflectance bidirectionnelle (auparavant dénommé réflectance) étaient calculés en utilisant la formule suivante:

$$R_{\lambda} = 10^{(ls-le)}$$

où,

R_{λ} = réflectance pour la longueur d'onde λ ,

ls = luminance de la cible,

le = luminance de l'étalon.

Dans la séquence étudiée, quatorze points ont été choisis comme représentatifs de la variabilité de la couverture pédologique. La couleur des sols est déterminée pour la totalité des sites en utilisant un code Munsell. Le fer total, le carbone organique, et la granulométrie ont été déterminés pour sept des quatorze sites en utilisant les méthodes décrites dans le manuel EMBRAPA (1979). Les réflectances sont mesurées, pour la totalité des sites, après une uniformisation de la surface, qui a consisté à éliminer les mottes de la surface des sols sans la compacter.

Dans la séquence, quatre sites ont été choisis pour étudier:

- l'effet de la rugosité, déterminée par deux formes de préparation du sol (labour et lit de semence).
- et l'effet de l'humidité, à deux niveaux, sol humide et sol sec.

La combinaison des deux niveaux d'humidité avec les deux niveaux de rugosité conduit à définir quatre états de surface:

- T1: sec et lit de semence.
- T2: sec et labouré.
- T3: humide et lit de semence.
- T4: humide et labouré.

Pour pallier les irrégularités de la surface, provoquées par les travaux de préparation du sol, les mesures ont été réalisées sur trois petites parcelles (1 m²) pour chaque état de surface. Sur chaque parcelle, quatre mesures ont été faites, de façon à couvrir toute la surface.

Pour étudier l'effet de l'humidité, ces parcelles ont été mouillées, puis leur humidité suivie journalièrement en faisant un échantillonnage sur les 0,5 cm supérieurs du sol. Simultanément aux mesures radiométriques un autre échantillonnage était fait toujours dans le même but. Les mesures radiométriques ont été réalisées lorsque les sols étaient humides (22% à 28%) et secs (4% à 12% d'humidité). Pour les sols étudiés les humidités correspondant aux point de flétrissement varient de 16,7% à 19,4% et à la capacité au champ de 28,9% à 32%

RESULTATS ET DISCUSSION

La figure 1 schématise la pédoséquence étudiée et montre la localisation des 14 sites. Le tableau 1 précise quelques caractéristiques de la surface des sols. Cette séquence est très représentative des couvertures pédologiques dans le District Fédéral et, d'une façon plus générale, des Cerrados. La couleur et les teneurs en fer sont les propriétés les plus variables à la

corrélation entre la variation de couleur, la profondeur de la nappe phréatique, les teneurs en fer et la forme minéralogique (hématite ou goethite) dominante de ce constituant. Les teneurs en fer sont en rapport direct avec la profondeur de la nappe et, dans le cas présent, avec la position topographique. Vers le bas de la toposéquence (nappe progressivement moins profonde), les conditions de réduction sont plus intenses et les

s'accompagne d'un enrichissement en goethite par rapport à l'hématite. En effet, l'hématite, de couleur rouge, est une forme minéralogique du fer plus facilement réduite que la goethite, de couleur jaune. A l'extrémité aval de la séquence la nappe est très proche de la surface, les conditions de réduction sont encore plus sévères et la goethite est aussi éliminée du système. Les variations de couleurs, perceptibles à la surface ainsi bien qu'en profondeur, sont révélatrices de processus pédogénétiques importants pour la compréhension de l'organisation pédologique en régions tropicales.

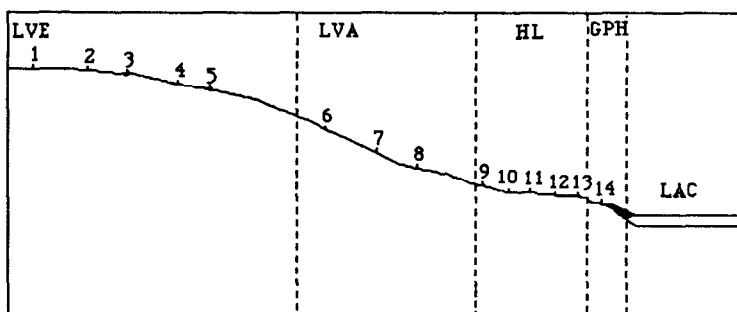


Figure 1. Schéma de la pédosequence étudiée

Site	Coul. Munsell sec	Fer total %	C-organic %	Texture (% argile)	Classe de sol*
1	2,5YR4/6	13,2	2,09	arg.(84)	LVE
2	3,5YR5/8			arg.	LVE
3	3,5YR4/6	11,7	1,84	arg.(83)	LVE
4	5YR4/7			arg.	LVE
5	5YR5/6	10,1	2,58	arg.	LVE
6	6,5YR5/4	8,2	1,99	arg.(86)	LVA
7	10YR5/4	8,6	1,86	arg.(82)	LVA
8	10YR5/3			arg.	LVA
9	10YR6,5/3	2,9	1,98	arg.(80)	HL
10	10YR7/1,5			arg.	HL
11	10YR8/1			arg.	HL
12	2,5Y7/0			arg.	HL
13	2,5Y6/1			arg.	HL
14	10YR5/1	1,8	1,65	arg.(54)	GPH

Tableau 1. Quelques caractéristiques de la surface des sols des sites étudiés (* -LVE= Latosol Vermelho Escuro; LVA= Latosol Vermelho Amarelo; HL= Laterita Hidromorfica; GPH = Gley Peu Humique).

Les courbes de réflectance obtenues pour les 14 sites sont représentées sur la figure 2. Construites à partir de dix points du spectre, les courbes ne permettent pas la perception des bandes étroites d'absorption. Pourtant, elles sont suffisantes pour caractériser l'allure générale des réponses spectrales des sols. Analysant les données de réflectance de 160 échantillons d'une large variété de sols, CONDIT (1970) a réussi à modéliser la réflectance spectrale entre 320 nm et 1000 nm à partir des mesures à 440, 540, 640, 740 et 860 nm. Les conditions adoptées dans notre travail (pas de 50 nm avec 10 mesures entre 400 et 1050 nm) et celles que CONDIT a trouvées idéales pour la modélisation des réponses spectrales des sols doivent permettre de bien caractériser les types de courbes de réflectance pour chacun de ces sites.

En effet, les courbes de réflectance des 14 sites représentatifs ont pu être regroupées selon les trois courbes types de CONDIT. La courbe correspondant au site 14 (sol à gley peu humique) se rattache au type I et se caractérise par des intensités faibles de réflectance et une forme générale concave avec les pentes croissantes avec les longueurs d'onde.

Les lateritas hidromorficas (sites 9 à 13) présentent des réponses spectrales proches du type II décrit par CONDIT. Les principales caractéristiques de ces courbes sont une forme presque convexe et des intensités relativement élevées.

Le troisième type de courbe, correspondant au type III de CONDIR caractérise les latossols (LVE, LVA). Riches en oxydes de fer, les latossols présentent des réponses spectrales fortement influencées par des absorptions électroniques de ces minéraux (HUNT et SALISBURY, 1970; SHERMAN et al 1982). Ces courbes se caractérisent par de faibles pentes

décroissance de la pente entre 600 et 750nm. De plus, l'absorption à 860nm est responsable du changement de direction de la courbe à partir de 850nm.

En analysant des spectres de 481 échantillons (parmi lesquels 3 oxisols) de 246 séries de sols, STONER (1981) a ajouté 2 types de courbes aux trois définies par CONDIR. Le plus grand mérite de STONER a été pourtant de relier les courbes types aux propriétés physico-chimiques des sols, comme la teneur en matière organique et en oxydes de fer, la minéralogie et le drainage naturel. STONER a appelé, par exemple, la courbe III de "affectée par le fer" (iron affected) et a déterminé les teneurs en oxydes de fer (1 à 4%) et de matière organique (0 à 2%) pour les sols présentant ce type de courbe. Ces valeurs sont en forte discordance avec les sols étudiés ici: sites 1, 2, 5, 6, 7 (cf. Tableau 1). Ces résultats mettent en évidence certaines particularités des réponses spectrales des latossols, et la nécessité d'études plus approfondies pour mieux comprendre ces propriétés spectrales.

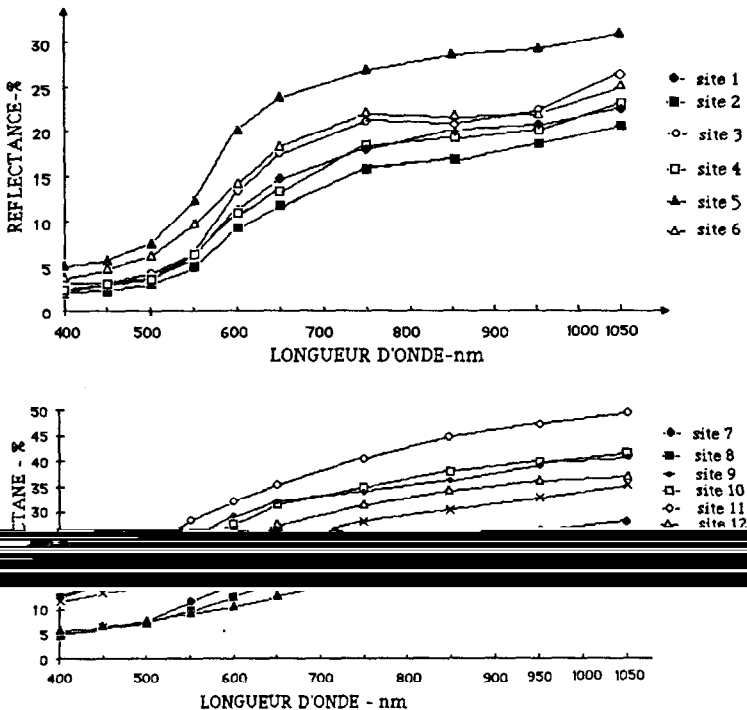


Figure 2: Courbe de réflectance pour les 14 sites a- sites 1 à 6 b- sites 7 à 14

Les coefficients trichromatiques X, Y, Z, ont été déterminés à partir de la couleur Munsell, en utilisant les tableaux contenus dans l'ouvrage de WYSZECKI et STILES (1982). La matrice de corrélation dérivée à partir de

ces données (tableau 2) montre une forte corrélation entre les valeurs tristimuli et les données de réflectance du visible. Cette correspondance entre la couleur des sols mesurée par des méthodes radiométriques et par des notations Munsell a été soulignée par de nombreux auteurs. (SHIELDS et al, 1968, FERNANDEZ et SCHULZE, 1987 ESCADAFAL et al 1988a, ESCADAFAL et al ,1988b).

	X	Y	Z
R450	0,966	0,968	0,951
R500	0,974	0,971	0,946
R550	0,983	0,965	0,918
R600	0,935	0,908	0,836
R650	0,951	0,927	0,863
R750	0,955	0,951	0,899

Tableau 2. Matrice de corrélation entre les coefficients chromatiques X, Y, Z, dérivés de la couleur Munsell et les réflectances du visible pour les 14 sites

La nécessité de trois variables pour la caractérisation de la couleur dans le système CIE rend difficile son utilisation pratique par la plupart des pédologues. TORRENT et al (1983), ont déterminé un indice de rougeur des sols, calculé à partir des valeurs de la notation Munsell et qui présente une bonne corrélation avec les teneurs en hématite pour un nombre élevé d'échantillons de sols. Cet indice est calculé comme indiqué ci dessous:

$$RR=(10-H)*C/V,$$

où V et C sont les valeurs de "value" et "chroma" de la notation Munsell et H les valeurs de "hue" transformé selon une échelle de 0 à 10 attribuée respectivement aux notations 10YR et 10R.

On a utilisé la formule de TORRENT pour le calcul du RR avec une transformation de l'échelle des teintes. La valeurs 0 a été attribuée à H pour les notations 2,5Y compte tenu que les teintes 10YR ne sont pas complètement dépourvues de la couleur rouge. Les valeurs ainsi obtenues ont été comparées aux valeurs de réflectance mesurées. On trouve une bonne corrélation entre l'indice de rougeur et le rapport réflectance à 650nm /réflectance à 450nm (figure 3). Comme ces longueurs d'onde sont proches des canaux TM1 (450-520nm) et TM3 (620-690nm) de Thematic Mapper ce rapport peut être utile pour la cartographie pédologique dans la zone étudiée. La vérification de cette possibilité sera faite dans la suite de ce travail

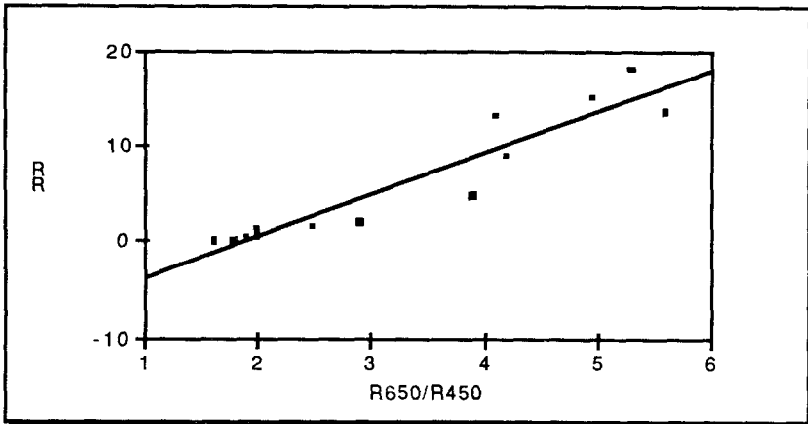


Fig.3 Corrélation entre l'indice de roujeur RR et le raport R650/R450.
 $(y = -8,175 + 4,342x, r = 0,95)$

Les effets des différents états de surface sur la réflectance des sols (sites 2, 4, 8, et 14) ont été étudiés selon à la procédure décrite précédemment.

La figure 4 montre les courbes de réflectance des quatre types de sols pour chacun des états de surface. Ces courbes permettent de préciser les effets de la rugosité (labour ou lit de semence), dans les conditions d'humidités faibles (4% à 12%) et élevées (22% à 28%), et inversement, les effets de l'humidité lorsque les surfaces sont rugueuses ou unies. On vérifie que, pour des conditions croissantes de rugosité et d'humidité, les valeurs de réflectance diminuent dans tout le spectre. Pour les latossols (sites 2, 4 et 8) cette diminution, due aux variations d'humidité, est sensiblement plus importante que la diminution due au labour. Pour le sol à gley peu humique (site 14) cette tendance est la même entre 400 nm et 650nm. A partir de cette longueur d'onde le labour produit un effet comparable à celui de la variation de l'humidité de 8% à 24%. Les faibles différences de réflectances entre les états de surface T1 et T2 pour le latosol vermelho escuro (LVE) du site 2 ont deux types d'explicaton: d'une part les variations produites par les différents états de surface sont moins importants que pour les autres sites comme le montre l'ensemble des courbes, et d'autre part l'humidité pour l'état T2 (4%) est significativement plus basse que pour l'état de surface T1 (10%). Par conséquent, il est fort possible que la diminution des valeurs de réflectance due au labour soit compensée, en partie, par une humidité plus faible de l'état de surface T2.

Les courbes pour l'état de surface T4 semblent cumuler les effets du labour et de l'humidité sur la réflectance. Les données montrent que l'addition de l'effet humidité (T3) et de l'effet rugosité (T2) s'approchent des effets conjoints des deux facteurs.

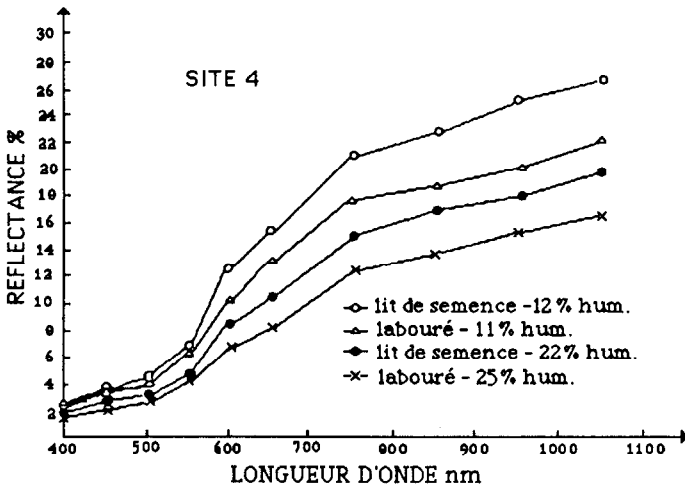
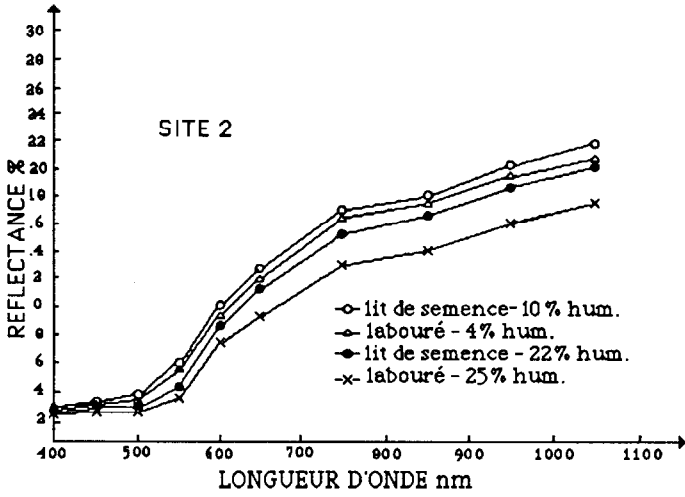


Figure 4 a. Courbes de réflectance des sites 2, 4 dans quatre états de surface. Les valeurs sont la moyenne de mesures sur trois parcelles.

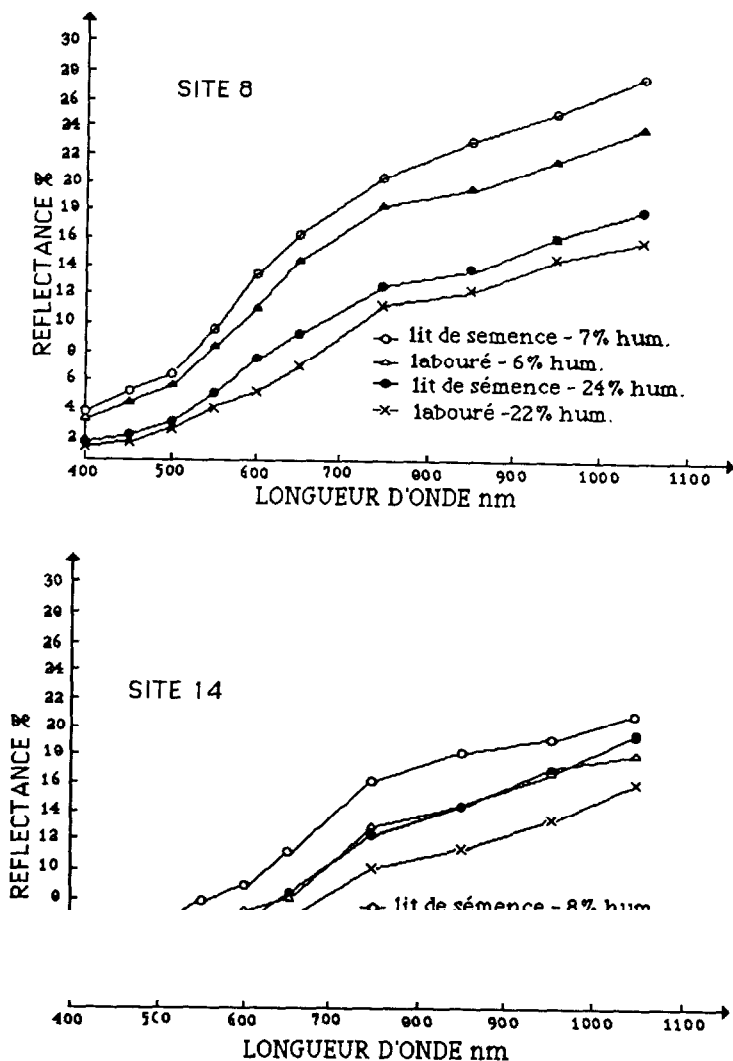


Figure 4 b. Courbes de réflectance des sites 8 et 14 dans quatre états de surface. Les valeurs sont la moyenne de mesures sur trois parcelles.

Les effets de la rugosité induite par les travaux du sol, et de l'humidité sur la réflectance sont de natures différentes. Le labour produit des mottes qui créent de l'ombre. Ces effets d'auto-ombrage ont été bien étudiés par CIERNIEWSKI (1984, 1987) qui est arrivé à modéliser les altérations produites sur la réflectance par l'ombre due à la présence de structures motteuses à la surface des sols. L'humidité influence la réflectance des sols, car l'indice de réfraction de l'eau est supérieur à l'indice de réfraction de l'air. Les rapports entre réflectance état humide et état sec ont été décrits par ANGSTRON (1925) comme inversement proportionnels au carré de l'indice de diffraction du milieu diffuseur. PLANET (1970), a suggéré que les constituants du sol dissous dans l'eau peuvent aussi affecter la réflectance à cause des changements de la transmissivité et de l'indice de réfraction du liquide.

Cette différence, en nature, des effets de la rugosité et de l'humidité rend logique l'hypothèse d'additivité des effets de ces deux facteurs.

La figure 5 montre les courbes de réflectance des quatre sites pour les états de surface sec et uni T1 (a) et humide et labouré T4 (b). On constate que, pour l'état sec et uni, les réponses spectrales sont très distinctes entre les différents sites. Pour l'état humide et labouré il y existe une convergence des valeurs de réflectance des quatre sols, particulièrement perceptible pour les longueurs d'onde supérieures à 600nm. Une conséquence immédiate de ce phénomène est l'importance de la sélection de la date d'acquisition des images pour le travail de cartographie des sols. La stabilité du régime pluviométrique, typique des cerrados, avec un période de 5-6 mois sans pluies importantes (ADAMOLI et al, 1987), et la pratique d'une préparation du sol pour les semis au moment des premières pluies en octobre/novembre déterminent un période avec des états de surface semblables à T1, donc optimun pour la discrimination des types de sol.

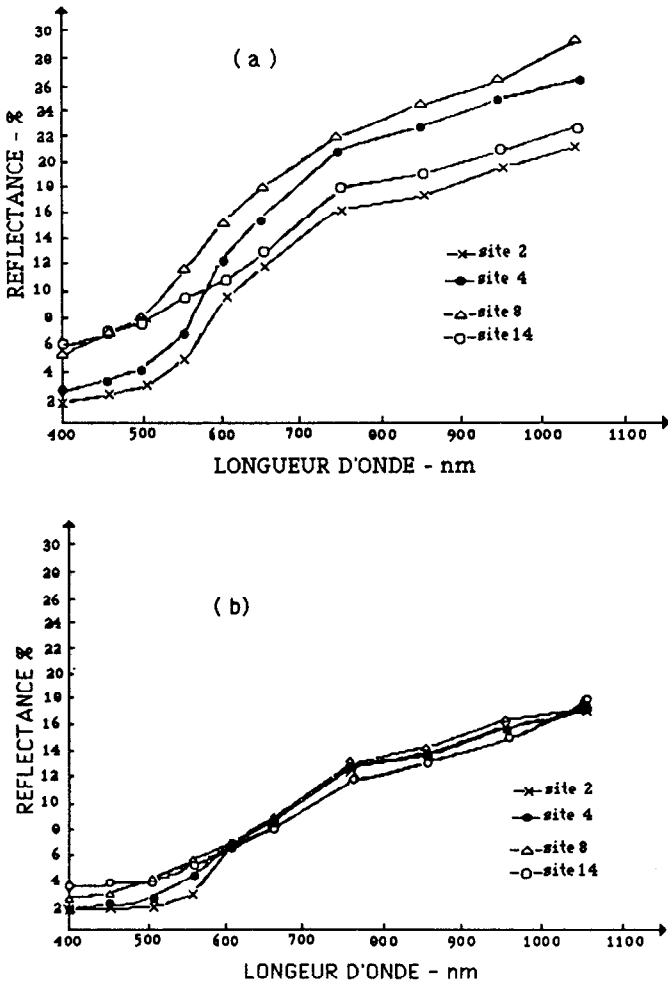


Fig. 5. Réponses spectrales des quatres sites aux états de surface T1 (a) et T4 (b)

La matrice de corrélation entre les réflectances des 10 points du spectre est présentée dans le tableau 3. La totalité des 48 mesures (4 sites x 4 états de

surface x 3 parcelles) pour chaque longueur d'onde a été considérée pour le calcul des coefficients de corrélation. On vérifie une mauvaise corrélation entre réflectances bleu (400 à 500 nm)/rouge et proche infra-rouge ($r=0,43$ à $0,63$). Les parties du spectre correspondantes au rouge et proche infra-rouge sont fortement corrélées ($r=0,93$ à $0,97$). La réflectance dans le vert (550nm) est assez fortement corrélée ($r=0,85$ à $0,95$) avec le bleu, beaucoup moins avec le rouge et proche infra-rouge ($r= 0,75$ à $0,83$)

	R400	R450	R500	R550	R600	R650	R750	R850	R950	R1050
R400	1,000									
R450	0,967	1,000								
R500	0,956	0,974	1,000							
R550	0,856	0,910	0,953	1,000						
R600	0,521	0,608	0,674	0,829	1,000					
R650	0,435	0,540	0,597	0,768	0,961	1,000				
R750	0,430	0,524	0,592	0,752	0,959	0,958	1,000			
R850	0,461	0,545	0,621	0,771	0,956	0,942	0,975	1,000		
R950	0,446	0,536	0,602	0,753	0,948	0,928	0,975	0,966	1,000	
R1050	0,532	0,622	0,674	0,804	0,947	0,937	0,949	0,936	0,945	1,000

Tableau 3. Matrice de corrélation entre les réflectances à 10 longueurs d'onde pour les quatre types de sols sous les quatre états de surface T1, T2, T3, T4.(48 mesures pour chaque longueur d'onde)

les réflectances conservent une bonne corrélation. Par contre, sur le plan R650/R450 on constate une dispersion apparemment désordonnée.

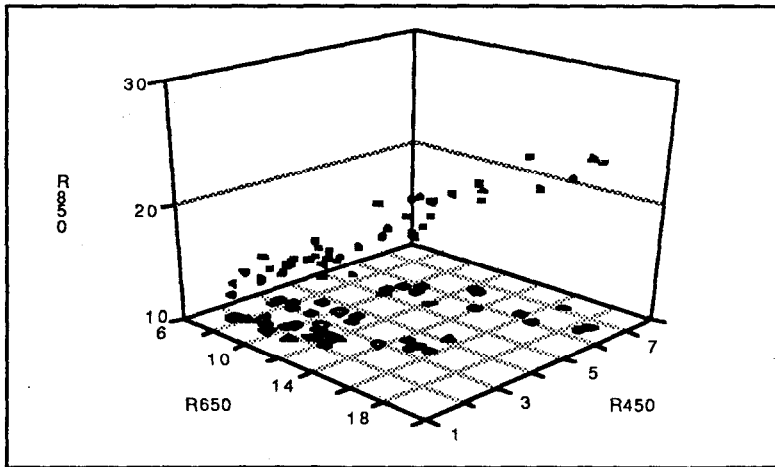


Figure 5. Diagramme tridimensionnel montrant la dispersion des réflectances à 450nm, 650nm, et 850nm pour les différents états de surface des sols (sites 2, 4, 8, et 14).

Une visualisation plus détaillée du nuage de points sur le plan défini par les axes R650nm et R450nm (figure 6) permet de constater qu'en fait ce plan est défini par des secteurs, et que chacun de ces secteurs représente un sol avec ses différents états de surface. Comme nous l'avons noté précédemment le rapport R650nm/R450nm est en relation avec la couleur des sols. ESCADAFAL (1989) a montré aussi que les canaux TM1 et TM3 du Thematic

Mapper pour une zone désertique sont relativement peu corrélés et il a relié ce fait à des différences de couleur des sols. Le changement de couleur des

(SHIELDS et al 1968, SOUZA et al 1964). La clarté et la saturation sont les plus affectées par l'humidité, et le taux de changement est variable pour les différents sols. L'ombre due à la rugosité change aussi la couleur des surfaces.

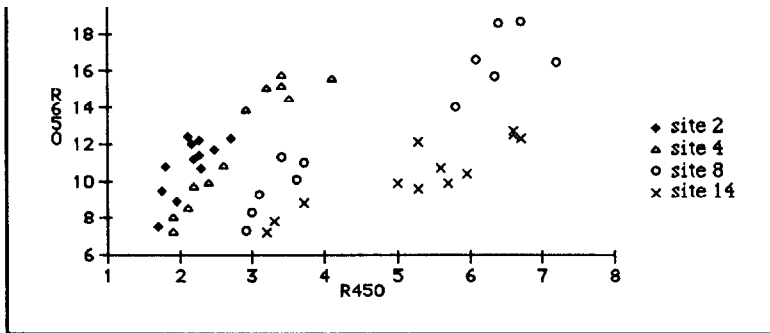


Figure 6. Histogramme bidimensionnel des réflectance 650 nm / 450 nm pour les différents états de surface des sols (sites 2, 4, 8, et 14.)

CONCLUSION

Les variations latérales observées dans une couverture pédologique à dominance de latosols sont mises en évidence au travers des réponses spectrales de 14 sites obtenues avec un radiomètre portatif. Latosolos,

spectrales de formes différentes. Les variations de couleur du rouge au gris en passant par le jaune brunâtre, indiquant des processus pédogénétiques importants, sont bien corrélées avec le rapport réflectance à 650nm/réflectance à 450nm. Par conséquent, on postule l'hypothèse de l'utilité des bandes TM1 et TM3 pour la cartographie de ces variations .

Les états de surface caractérisés par une rugosité élevée (labour) et une forte humidité tendent à atténuer ces différences par rapport à des états de surface plus unis (lit de semence) et secs. Les données obtenues suggèrent que les effets du labour et de l'humidité, dans le limites de l'expérience réalisée, sont "additifs": l'effet provoqué sur la réflectance par le labour et par l'humidité est égal à l'addition des effets isolés de chacun de ces facteurs.

C'est dans l'état de surface sec et uni que les sols de la séquence étudiée présentent les meilleures possibilités d'être discriminés par leurs réponses spectrales. L'humidité et la rugosité provoquent une convergence des valeurs de réflectance parmi les sols.

Indépendamment du type de sol et de l'état de surface, les réflectances correspondant au rouge et proche infra-rouge sont très corrélées, tandis que, pour les longueurs d'onde du bleu et du rouge, les corrélations sont faibles pour différents sols mais plus élevées pour un même sol sous différents états de surface.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMOLI (J.), MACEDO (J.), AZEVEDO (L.G.), SILVA MADEIRA NETTO (J.), 1987. Caracterização da região dos Cerrados. **In** GOEDERT, W.(ed.), Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo. S. Paulo. Nobel, pp 33-74.
- ANGSTOM (A.), 1925. The albedo of various surfaces of ground. *Geografiska Ann.*, 7, 323.
- BOWERS (S.A.), HANKS (R.J.), 1965. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Sci.*, 100(2):130-138.
- CELIS-CEUSTER (A.M.), 1980. Ground truth radiometry (Exotech) on bare and overgrown Belgian soils. *Pédologie*, XXX(1):43-63.